

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij naftnog rudarstva

**TEMELJNE POSTAVKE ZA PROJEKTIRANJE BUŠOTINE**

Diplomski rad

Boris Čulić  
N-93

Zagreb, 2015.

## TEMELJNE POSTAVKE ZA PROJEKTIRANJE BUŠOTINE

Boris Čulić

Diplomski rad izrađen:

Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

### Sažetak

Projektiranje bušotine je jedan od najzahtjevnijih procesa bušačkog inženjerstva. Izrada projekta bušotine provodi se u zasebnim segmentima određenim redoslijedom jer su ti segmenti međusobno zavisni jedni o drugima. Samim projektom trebaju biti obuhvaćeni i podešeni brojni parametri koji uvjetuju uspješnu izradu bušotine te u konačnici proizvodnju dostatnih i ekonomski isplativih količina proizvodnog fluida. Najbitniji kriteriji koji moraju biti zadovoljeni tijekom izrade projekta su sigurnost osoblja, odnosno siguran način izrade kanala bušotine koji neće sigurnost osoblja dovesti u pitanje te isplativost izrade bušotine, gledano s ekonomskog stajališta. Ukoliko se ta dva uvjeta ne mogu zadovoljiti, ne može se započeti izrada kanala bušotine.

Ključne riječi: projekt bušotine, izrada kanala bušotine, sigurnost osoblja, kriteriji za izradu kanala bušotine.

Diplomski rad sadrži: 37 stranica, 8 slika, 1 prilog i 18 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a

Ocjenjivači: 1. Dr. sc. Zdenko Krištafor, redoviti profesor RGNF-a  
2. Dr. sc. Katarina Simon, redovita profesorica RGNF-a  
3. Dr. sc. Borivoje Pašić, docent RGNF-a

Datum obrane: 30.09.2015.

## **BASICS OF WELL PLANNING**

Boris Čulić

Thesis completed in:

University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

### **Abstract**

Well planning is one of the most demanding procedures in drilling engineering. Construction of a well plan is conducted in a separate segments in a particular order because all of those segments are interdependent. Well plan should consist of a series of adjusted parameters which will affect on successful construction of a well and on the cost efficient production of sufficient amount of fluid. The most important criterions during making of a well plan are personel safety, with reference to construction of a well in such a way that it will not endanger the personel safety, and profitability of a well, from economical standpoint. If those two criterions cannot be fulfilled, the process of constructing a well can not be initiated.

Keywords: well plan, well construction, personel safety, well construction criterions.

Thesis contains: 37 pages, 8 figures, 1 enclosure and 18 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD. Zdenko Krištafor, Full Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb

Reviewers: PhD. Zdenko Krištafor, Full Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb  
PhD. Katarina Simon, Full Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb  
PhD. Borivoje Pašić, Assistant Professor, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Zagreb

Date of defense: 30.09.2015.

## **SADRŽAJ:**

<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>III</b>
<b>POPIS PRILOGA.....</b>	<b>IV</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. DIJAGRAM TOKA.....</b>	<b>2</b>
<b>3. OPREMANJE BUŠOTINE.....</b>	<b>3</b>
<b>4. PUTANJA I STABILNOST KANALA BUŠOTINE.....</b>	<b>5</b>
4.1. Putanja bušotine.....	5
4.2. Stabilnost kanala bušotine.....	6
<b>5. BUŠOTINSKI FLUID.....</b>	<b>9</b>
5.1. Vrste isplake.....	9
5.2. Zadaci i svojstva isplake.....	10
5.3. Aditivi.....	11
<b>6. ZAŠTITNE CIJEVI.....</b>	<b>12</b>
6.1. Određivanje dubina dna kolona zaštitnih cijevi.....	12
6.1.1. Određivanje dubine dna međukolone.....	14
6.1.2. Određivanje dubine dna uvodne kolone.....	14
6.1.3. Određivanje dubine dna usmjerivača.....	15
6.2. Odnosi promjera dlijeta i zaštitnih cijevi.....	15
6.3. Odabir zaštitnih cijevi.....	17
<b>7. NIZ BUŠAĆIH ALATKI I OPREMA UŠĆA BUŠOTINE.....</b>	<b>19</b>
7.1. Niz bušaćih alatki.....	19
7.1.1. Dubinski sklop alatki.....	19
7.1.2. Teške i bušaće šipke.....	20
7.2. Oprema ušća bušotine.....	20
7.2.1. Bušotinska glava.....	20
7.2.2. Protuerupcijski sustav.....	21

<b>8. ČIŠĆENJE KANALA BUŠOTINE I CEMENTACIJA.....</b>	<b>23</b>
<b>8.1. Hidraulički sustav.....</b>	<b>23</b>
8.1.1. Hidrostatski tlak.....	23
8.1.2. Uzgon.....	24
8.1.3. Tip protjecanja.....	24
8.1.4. Reološki model.....	25
8.1.5. Hidraulička snaga na dlijeto.....	26
8.1.6. Kolebanje tlakova.....	26
<b>8.2. Cementacija.....</b>	<b>26</b>
8.2.1. Cementna kaša i aditivi.....	27
8.2.2. Oprema za cementaciju.....	28
<b>9. ODABIR DLIJETA.....</b>	<b>29</b>
<b>9.1. Vrste dlijeta.....</b>	<b>29</b>
9.1.1. Žrvanjsko dlijeto.....	30
9.1.2. Dijamantno dlijeto.....	30
9.1.3. PDC dlijeto.....	31
<b>9.2. Karakteristike dlijeta.....</b>	<b>32</b>
<b>10. BUŠAĆE POSTROJENJE.....</b>	<b>33</b>
<b>11. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>35</b>
<b>12. LITERATURA.....</b>	<b>36</b>

## **POPIS SLIKA:**

<b>Slika 2-1.</b> Dijagram toka-redoslijed izrade pojedinih sastavnica projekta bušotine.....	2
<b>Slika 4-1.</b> Dopušteni raspon gustoće isplake.....	7
<b>Slika 6-1.</b> Određivanje dubina peta kolona zaštitnih cijevi na temelju gradijenata pornog tlaka i tlaka raspucavanja naslaga.....	12
<b>Slika 6-2.</b> Odabir dubine dna uvodne kolone.....	14
<b>Slika 6-3.</b> Dijagram odabira zaštitnih cijevi i dlijeta.....	15
<b>Slika 7-1.</b> Preventerski sklop.....	21
<b>Slika 8-1.</b> Tipovi protjecanja.....	24
<b>Slika 9-1.</b> Bušaća dlijeta.....	30

## **POPIS PRILOGA:**

**Prilog 1.** Dijagram toka – faze projektiranja prema S. Devereuxu

## 1. UVOD

Projektiranje bušotine je jedan od najzahtjevnijih procesa bušačkog inženjerstva. Za uspješno projektiranje bušotine potrebno je uklopiti bušaće zakone i propise, korporativne odredbe nosioca izrade projekta i znanje stečeno iskustvom. Iako se u naftnoj industriji metode i načini projektiranja bušotina mogu razlikovati, krajnji rezultat treba biti projekt koji omogućava sigurnu izradu kanala bušotine minimalne cijene koštanja za određenu željenu proizvodnju nafte/plina. Nažalost, nije moguće zadovoljiti te uvjete za svaku bušotinu zbog različitih čimbenika (primjerice geološki uvjeti, bušaća oprema, temperatura, i dr.). Uvjet koji ima status prioriteta i koji se mora zadovoljiti je izrada bušotine na siguran način. Projekt mora biti izrađen na način koji omogućava siguran rad osoblja, ujedno dovoljno prilagodljiv da se po potrebi može izmijeniti u slučaju nepredviđenih opasnosti koje mogu ugroziti sigurnost osoblja. Sigurnost bušotine također ne smije biti upitna. Mogućnost eruptiranja iz bušotine ili drugih čimbenika koji mogu stvoriti potencijalne probleme treba svesti na najmanju moguću mjeru. Projektom je također potrebno omogućiti izradu bušotine uz minimalne financijske troškove, pod uvjetom da se ne ugrožavaju prethodno određeni sigurnosni faktori. U većini slučajeva troškovi se mogu smanjiti ako se uloži dodatni trud prilikom projektiranja bušotine. Posljednji uvjet koji određuje uspješan projekt je upotrebljivost bušotine, odnosno sposobnost bušotine da proizvodi ekonomski isplative količine nafte/plina. Ovaj uvjet je vrlo teško zadovoljiti u dubokim ležištima s visokim ležišnim tlakovima.

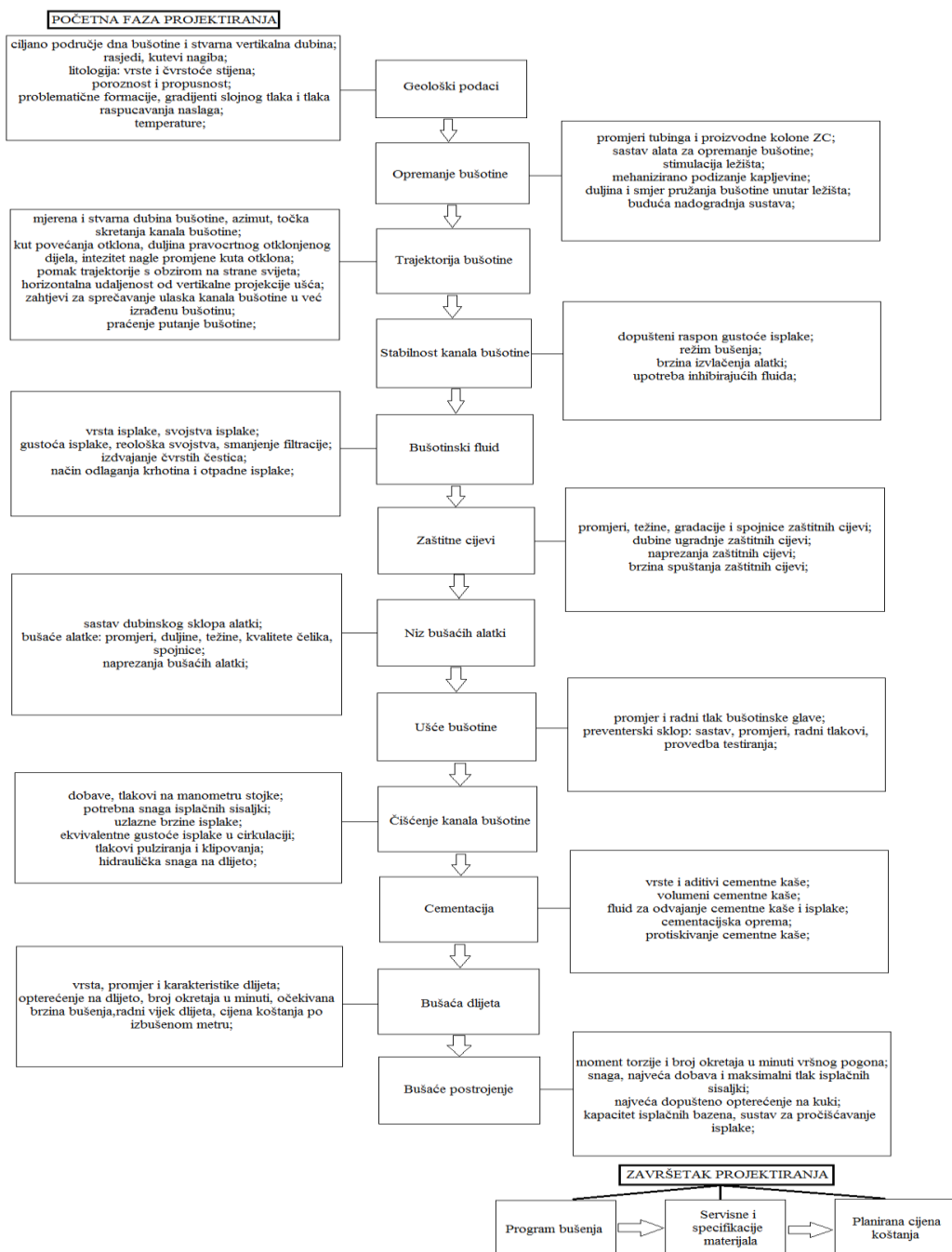
Projektiranje bušotine se vrši određenim redoslijedom tj. neki dijelovi sustava se moraju projektirati prije drugih dijelova sustava, jer izravno utječu na njihov odabir. Npr., prije odabira isplake moraju se prikupiti geološki podaci o formacijama koje će se bušiti i odrediti slojni tlakovi i tlakovi raspucavanja naslaga kako bi se mogla proračunati potrebna svojstva isplake za sigurno bušenje. Što se tiče samog izgleda i konstrukcije kanala bušotine, projektiranje se vrši od dna bušotine prema ušću, gdje je polazna točka željena proizvodnja i proizvodna oprema koja će takvu proizvodnju omogućiti.

U ovome radu će se pokušati sažeti tijek projektiranja bušotine, pritom navodeći najbitnije parametre koje je potrebno razmotriti prilikom izrade projekta bušotine.



## 2. DIJAGRAM TOKA

Prilagođeni dijagram toka, prikazan na slici 2-1., koristi se kao predložak prema kojem se izrađuje projekt bušotine. Sastoji se od segmenata koji se projektiraju određenim redoslijedom te od parametara koji se moraju odrediti u svakom pojedinom segmentu. Također, za svaki segment su određeni i potrebni ulazni parametri koji nisu prikazani na slici 2-1., a nalaze se na originalnoj shemi S. Devereuxa koja se može vidjeti u prilogu 1.



**Slika 2-1.** Dijagram toka-redoslijed izrade pojedinih sastavnica projekta bušotine (prilagođeno prema Devereux, 1998)

### 3. OPREMANJE BUŠOTINE

Odabir proizvodnog niza, odnosno tubinga, je bitan dio projekta bušotine. Tubing je niz cijevi koji omogućuje protok proizvodnog fluida, nafte i/ili plina, od proizvodne naslage do površine. U slučaju odabira neodgovarajućeg tubinga može doći do nemogućnosti obavljanja njegove pune funkcije, što zahtijeva skupocjene postupke popravka.

Da bi se moglo pristupiti odabiru proizvodne opreme, najprije treba pribaviti potrebne geološke podatke. Geolozi uz pomoć karotažnih mjerenja i dobivenih uzoraka (s okolnih bušotina) ili seizmičkih istraživanja dobivaju sliku podzemlja (nagibi slojeva, rasjedi) te određuju ciljanu lokaciju i dubinu dna bušotine. Moraju biti poznate vrste i tlačne čvrstoće stijena koje treba nabušiti, kao i njihove propusnosti i poroznosti. Također, moraju biti dostupne krivulje gradijenata pornog tlaka, tlaka raspucavanja naslaga i temperaturnog gradijenta, te je potrebno znati koje vrste fluida se očekuju tijekom izrade kanala bušotine i očekivani protok proizvodnog fluida. Kada su poznati svi potrebni geološki podaci, može se pristupiti odabiru proizvodne opreme.

Odabir tubinga započinje na dnu bušotine. S obzirom na očekivani protok proizvodnog fluida i uvjete u bušotini odabiru se unutarnji i vanjski promjer tubinga koji će omogućiti stabilnu proizvodnju te promjer proizvodnog niza zaštitnih cijevi koji će omogućiti ugradnju tubinga i potrebne proizvodne opreme. Za tubing je poželjno da ima konstantan unutarnji, a ako je moguće i konstantan vanjski promjer duž cijelog kanala bušotine (Clegg, 2007). S povećanjem dubine i tlaka, može doći do potrebe za ugradnjom tubinga veće kvalitete ili veće nominalne težine, kako bi tubing mogao podnijeti predviđena naprezanja. U takvim slučajevima se radije odabire tubing veće kvalitete, jer tada ne dolazi do promjene vanjskog promjera tubinga. Kada je odabran tubing, slijede proračuni koji će pokazati hoće li tubing podnijeti sva naprezanja koja se pojavljuju u bušotini. Redom se rade proračuni za uzdužno naprezanje, naprezanje zbog torzije, tlak rasprskavanja, tlak gnječenja, kombinirana naprezanja i ovalnost.

Osim odabira samog proizvodnog niza, ovaj dio projekta bušotine mora sadržavati i sastav proizvodne opreme koja će se ugraditi u bušotinu (pakeri, oprema za kontrolu dotoka pijeska). Pakeri su izolacijske alatke koje omogućuju proizvodnju fluida i kontrolu tlaka u bušotini (Matanović i Moslavac, 2011), te je u projektu bušotine potrebno navesti vrste i raspored pakera koji će se ugrađivati, kao i njihove osnovne karakteristike. Uz to,

potrebno je odrediti način kontrole dotoka pijeska (ugradnja filtra i/ili pješčanog zasipa). Kod ugradnje filtra, trebaju biti definirane dimenzije, smjer i raspored otvora/proreza, dok je za ugradnju pješčanog zasipa potrebno odrediti veličinu zrna pijeska zasipa i metodu postavljanja samog zasipa.

U slučajevima kada je proizvodnost bušotine nezadovoljavajuća, potrebno ju je povećati, odnosno, potrebno je stimulirati ležište. Najčešći način stimulacije ležišta je stvaranje pukotine u ležištu tj. hidrauličko frakturiranje, te se na taj način povećava kontaktna površina između ležišta i bušotine (Pandey). Drugi način stimulacije je kiselinska obrada stijena. To podrazumijeva utiskivanje kiseline u stijenu s ciljem uklanjanja uzročnika smanjene propusnosti stijene.

U većini slučajeva bušotina ne može omogućiti proizvodnju prirodnim, odnosno eruptivnim načinom. Samim time, oko 90% proizvodnih bušotina zahtijeva neki od sustava mehaničkog podizanja kapljevine (Matanović i Moslavac, 2011). Projektom bušotine potrebno je definirati način podizanja kapljevine (u slučaju da nije eruptivna) i opremu koju treba ugraditi za omogućavanje uspješne proizvodnje kapljevine. Najčešći načini mehaničkog podizanja su dubinske klipne sisaljke, podizanje kapljevine plinom, centrifugalne sisaljke i hidrauličko podizanje.

U ovome dijelu projekta bušotine također je potrebno navesti smjer pružanja i duljinu kanala bušotine u samome ležištu, kao i moguće načine nadogradnje sustava u budućnosti.

## 4. PUTANJA I STABILNOST KANALA BUŠOTINE

### 4.1. Putanja bušotine

Bušotine se po svojoj putanji (trajektoriji) mogu svrstati u tri skupine: vertikalne, koso usmjerene i horizontalne bušotine. Vertikalnom bušotinom se smatra pravocrtna bušotina čija se os poklapa s gravitacijskom vertikalom, dok se sve ostale bušotine mogu sastojati od dvije ili više dionica koje mogu biti koso usmjerene i/ili horizontalne. Pravilan odabir putanje bušotine je vrlo bitan kako bi se smanjio rizik od urušavanja kanala bušotine, pospješilo čišćenje kanala bušotine i odabrao smjer najpovoljnije bušivosti te u konačnici povećala proizvodnja.

Prije početka određivanja putanje bušotine moraju biti poznati geološki parametri (lokacija, dubina, oblik i orijentacija bušotine te problematične naslage i tendencija kanala bušotine skretanju od vertikale) te parametri vezani za opremanje bušotine (smjer pružanja i duljina kanala bušotine u ležištu i budući načini nadogradnje sustava).

Da bi se kanal bušotine mogao izraditi prema planiranoj putanji, mora biti poznato nekoliko ključnih parametara, kao što su mjerena i stvarna dubina bušotine, azimut bušotine te u slučaju koso usmjerenih i horizontalnih bušotina točka skretanja kanala bušotine. Da bi se moglo skrenuti kanal bušotine nužno je odrediti kut povećanja otklona kanala bušotine (*eng. build rate*) i duljinu dionice povećanja otklona kanala. Nakon skretanja kanala bušotine do određenog kuta, najčešće se nastavlja bušiti pravocrtno pod postignutim kutom otklona (*eng. walk rate*). Ako kut povećanja otklona premašuje vrijednost od  $3^{\circ}/30\text{ m}$ , riječ je o nagloj promjeni kuta otklona (Adams, 1985) te je potrebno navesti intezitet takve promjene (*eng. dogleg severity*). Kod skretanja kanala bušotine, također je potrebno odrediti smjer skretanja te horizontalnu udaljenost ciljane lokacije od vertikalne projekcije ušća. U slučaju da se u blizini kanala bušotine predviđenog za izradu nalazi jedna ili više već izrađenih bušotina, moraju se odrediti minimalni zahtjevi koji će onemogućiti njihovo približavanje ili ulazak kanala bušotine u već izrađeni kanal (*eng. collision*). Kako bi se na vrijeme otkrilo odstupanje od planirane putanje bušotine, potrebno je definirati kada će se obavljati mjerenja za praćenje putanje bušotine, osim u slučaju kada se koristi tehnologija mjerenja za vrijeme bušenja (*eng. Measurement While Drilling – MWD*).

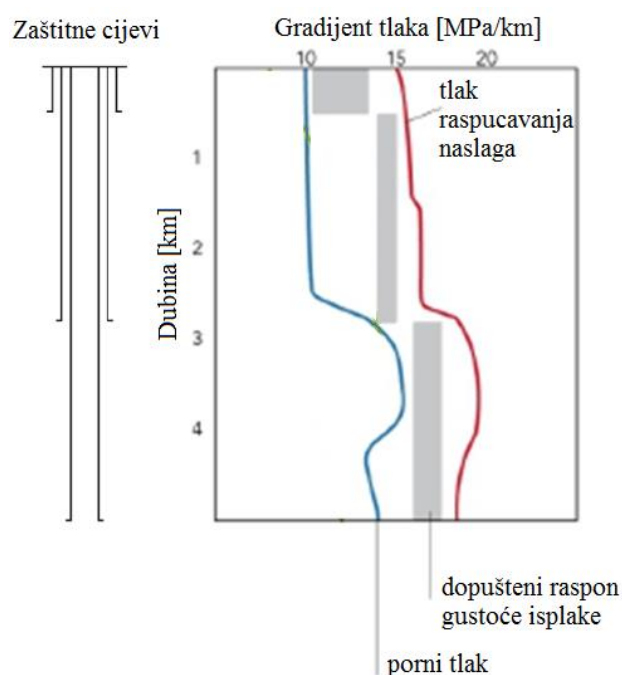
U današnje se vrijeme za određivanje putanje bušotine koriste razni kompjuterski programi, te neke naftne kompanije imaju razvijene svoje vlastite programe. Ipak, najpoznatiji i najčešće korišteni program za određivanje putanje bušotine je Halliburton Landmark's Compass. Međutim, ti programi imaju puno više funkcija od samog određivanja putanje bušotine. Njima se može izraditi geološki profil, birati različite kombinacije alati i dubinskog sklopa alati ili prikazati već izrađene bušotine u tom polju, kako bi se što bolje simulirali stvarni uvjeti. Programi koriste razne metode proračuna za određivanje točnih koordinata putanje bušotine, a projektanti mogu unositi željene parametre u program, npr. kut pod kojim se želi skrenuti kanal bušotine. Korištenje programa omogućava određivanje najpovoljnije putanje bušotine pomoću metode pokušaja i pogreške. Cilj je naći odgovarajuću putanju gledajući sa sigurnosnog i ekonomskog stajališta.

#### **4.2. Stabilnost kanala bušotine**

Održavanje stabilnosti kanala bušotine od izuzetne je važnosti za njenu uspješnu izradu te je zbog toga potrebno veliku pažnju posvetiti parametrima koji tu stabilnost mogu ugroziti. Pod nestabilnim kanalom bušotine podrazumijeva se kanal bušotine čiji je promjer različit od promjera dlijeta kojim je izbušen. Nestabilnost kanala bušotine je glavni uzrok problema tijekom bušenja (zaglava alata, povećana torzija, gubitak cirkulacije) koji rezultira skupocjenim gubitkom vremena, a ponekad i gubljenjem dijela ili cijele bušotine. Također, otežano je izvođenje karotaznih mjerenja, kao i njihova interpretacija. U pravilu, do nestabilnog kanala bušotine može doći djelovanjem triju različitih čimbenika: mehanički, kemijski ili kombinacija mehaničkih i kemijskih čimbenika. Djelovanje mehaničkih čimbenika uglavnom ovisi o nepovoljnoj gustoći isplake (prevelika ili premala) i neodgovarajućem režimu bušenja, dok djelovanje kemijskih čimbenika ovisi o nedovoljnoj količini inhibitora u isplaci, što rezultira neodgovarajućim svojstvima u odnosu na stijenu kroz koju se buši. Zbog toga je bitno odrediti potrebnu vrstu i količinu inhibitora koja se treba dodati u isplaku. Ipak, u većini slučajeva nestabilnost kanala bušotine uzrokovana je djelovanjem mehaničkih i kemijskih čimbenika istovremeno.

Potrebno je znati određene parametre, prije nego se može započeti s projektiranjem stabilnosti kanala bušotine. Iz prethodno projektiranih segmenata neophodno je poznavati orijentaciju bušotine (te duljinu i orijentaciju kanala unutar ležišta), litološke podatke, vrste

i tlačne čvrstoće stijena, gradijente tlakova (slojni i tlak raspucavanja naslaga), problematične formacije, tendenciju kanala bušotine skretanju od vertikale, promjer bušotine i proizvodne kolone zaštitnih cijevi te tlak pri napuštanju bušotine. Također, bitni su i podaci vezani uz putanju bušotine (lokacija bušotine, točka skretanja kanala, kut otklona bušotine, azimut).



**Slika 4-1.** Dopušteni raspon gustoće isplake (Backers, 2013)

Za projektiranje stabilnosti kanala bušotine najprije je potrebno obaviti geomehaničku analizu. To podrazumijeva obradu geomehaničkih podataka o podzemlju i, na osnovu tih podataka, izradu geomehaničkog modela podzemlja, što će olakšati predviđanje moguće nestabilnosti kanala bušotine i problema koji se u takvom slučaju javljaju. Radi se analiza i proračun stabilnosti kanala bušotine za dobiveni model i planiranu trajektoriju bušotine. Vrlo korisni mogu biti zapisi o bušenju s okolnih bušotina, gdje se može vidjeti na kojim dubinama i kakvi se problemi javljaju tijekom bušenja vezani uz nestabilnost kanala bušotine. Također, potrebno je odrediti dopušteni raspon gustoće isplake (*eng. mud weight window*) prikazan slikom 4-1. koji pokazuje minimalnu i maksimalnu gustoću isplake koja se može primjeniti za određenu sekciju bušotine. Raspon gustoće može varirati od velike do vrlo male, ovisno o duljini sekcije bušotine i vrstama stijena unutar sekcije.

Uz prethodno navedene parametre, potrebno je odrediti i optimalne režime bušenja za pojedine sekcije kako ne bi došlo do problema vezanih za nestabilnost kanala bušotine.

Također, moraju biti predviđena vremena za izvlačenje alatki iz bušotine, kao i brzine kojima će se manevri izvoditi te načini izvlačenja alatki (suho ili mokro vađenje).

Geomehanička analiza i izrada geomehaničkog modela pokazala se kao uspješna metoda određivanja stabilnosti kanala bušotine jer omogućuje brzu reakciju na probleme tijekom bušenja, što ujedno smanjuje troškove, a izrađeni model se može koristiti za više bušotina.

## **5. BUŠOTINSKI FLUID**

Isplaka ima ključnu ulogu u izradi bušotine, tj. njen glavni zadatak je omogućavanje uspješne izrade kanala bušotine. Svaka bušotina se razlikuje od ostalih s obzirom na naslage koje se buše i tlakove koji se susreću pa je stoga za svaku bušotinu potrebna isplaka drugačijih sastava i svojstava. Čak se i za bušenje određenih intervala iste bušotine koriste različite isplake. Neodgovarajuća svojstva isplake mogu biti uzrok velikih vremenskih i financijskih gubitaka, a u krajnjem slučaju mogu rezultirati i negativnom bušotinom. Zbog toga je potreban vrlo pažljiv pristup pri izradi detaljnog projekta bušotinskog fluida, odnosno isplake.

Za projektiranje bušotinskog fluida moraju biti poznate potrebne gustoće bušotinskog fluida za pojedine sekcije, potreba za inhibirajućim fluidima i fluidima koji ne oštećuju propusnost stijena pribušotinske zone, litološki podaci, vrste i tlačne čvrstoće stijena, slojni i tlakovi raspucavanja naslaga te njihovi gradijenti, problematične formacije i kut otklona bušotine.

Projektom bušotinskog fluida mora biti točno definirana vrsta isplake koja će se koristiti kod izrade pojedinog intervala bušotine, kao i njena svojstva, poput gustoće, viskoznosti, reoloških svojstava i filtracije (Bloys, Davis, Smolen, Bailey, Fraser, Hodder, 1994). Kako bi se moglo postići potrebna svojstva isplake moraju biti poznate vrste i količine aditiva koji se trebaju dodati u isplaku. Za vrijeme izrade kanala bušotine u isplaci se može povećati količina čvrstih čestica i time promijeniti svojstva isplake, te je zbog toga potrebno odrediti opremu za kontrolu i izdvajanje čvrstih čestica iz isplake. Također se mora definirati način zbrinjavanja otpadne isplake i krhotina.

### **5.1. Vrste isplake**

Isplake se u pravilu, s obzirom na kontinuiranu fazu, dijele na isplake na bazi vode i na bazi ulja. Glavne komponente takvih isplaka su kontinuirana faza (voda ili ulje), glina i aditivi. Osim njih kao bušotinski fluidi mogu se koristiti i pjene te sustav ispuhivanja zrakom. Najčešće su u upotrebi isplake na bazi vode, koriste se u gotovo 80% slučajeva (Oilfield Market Report, 2004.). Kod takve isplake kontinuirana faza je voda, koja može biti slatka ili slana, a može sadržavati ulje ili zrak kao dispergiranu fazu. Isplake na bazi ulja sadrže ulje kao kontinuiranu fazu, a najčešće se koriste u bušenju naslaga koje sadrže



sumporovodik ili za održavanje stabilnosti kanala bušotine kod bušenja naslaga podložnih hidrataciji. Uljne isplake se dijele na čiste (sadrži do 5% vode) i inverzne (sadrži do 40% vode). Neke od prednosti upotrebe isplake na bazi ulja su te da ne oštećuju proizvodne naslage, stabilne su na visokim temperaturama, znatno smanjuju trenje i štite bušaću alatku od korozije. S druge strane, toksičnija je od isplake na bazi vode, izrada je otežana i skupa te je osjetljiva na promjenu udjela vode.

## **5.2. Zadaci i svojstva isplake**

Isplaka mora biti dizajnirana tako da može izvršiti sve svoje zadatke (Adams, 1985.):

- čišćenje dna bušotine,
- uklanjanje krhotina iz kanala bušotine,
- hlađenje i podmazivanje alatki u bušotini,
- ostvarenje protutlaka na stijenke kanala bušotine,
- sprečavanje smanjenja propusnosti ležišnih stijena,
- održavanje stabilnosti kanala bušotine,
- stvaranje isplačnog obloga duž kanala bušotine,
- sprečavanje korozije zaštitnih cijevi i bušaćih alatki,
- omogućavanje izvođenja potrebnih mjerenja,
- povećanje mehaničke brzine bušenja i
- smanjenje potrebne snage za spuštanje i izvlačenje alatki.

Kako bi isplaka mogla obaviti svoje zadatke, moraju biti točno podešena njena svojstva: gustoća, reološka svojstva i filtracija.

Vrlo je bitno odrediti potrebnu gustoću isplake jer se na taj način kontrolira hidrostatski tlak u kanalu bušotine. Premala gustoća isplake može dovesti do dotoka slojnog fluida ili urušavanja kanala bušotine, dok prevelika gustoća može dovesti do raspucavanja naslaga i gubljenja cirkulacije isplake. Iz tih je razloga tijekom izrade kanala bušotine potrebno provjeravati gustoću isplake na ulazu i izlazu iz bušotine. Gustoća isplake utječe na čišćenje dna bušotine, uklanjanje krhotina iz kanala bušotine, ostvarenje protutlaka na stijenke kanala bušotine i povećanje mehaničke brzine bušenja.

Viskoznost, naprezanje pri pokretanju i čvrstoća gela su reološka svojstva isplake. Posebno su važna jer utječu na uklanjanje krhotina iz kanala bušotine, sprečavanje padanja krhotina za vrijeme prekida cirkulacije te otpuštanje krhotina na površini.

Filtracija isplake definirana je kao proces izdvajanja tekuće faze iz isplake u stijenu pod djelovanjem diferencijalnog tlaka te kao takva bitno utječe na brzinu bušenja. Filtracijom isplake na stijenama kanala bušotine dolazi do stvaranja isplačnog obloga te se na taj način pospješuje stabilnost kanala bušotine i sprečava daljnje oštećenje nabušenih naslaga.

### **5.3. Aditivi**

Budući da isplaka ima mnogo zadataka i zbog toga mora imati točno podešena svojstva, nije dovoljno samo odabrati isplaku s obzirom na kontinuiranu fazu. Iz tog razloga u isplaku se dodaju aditivi za podešavanje svojstava kao što su gustoća, viskoznost i filtracija. Za povećanje gustoće u isplaku se dodaju oteživači, odnosno topive soli (natrijev klorid, kalcijev klorid) ili čvrste čestice, od kojih se najčešće koriste kalcijev karbonat, barit i hematit. Smanjenje gustoće isplake ostvaruje se dodavanjem vode ili isplake manje gustoće ili injektiranjem zraka ili dušika. Viskoznost je vrlo bitno svojstvo o kojem ovisi sposobnost isplake da iznosi krhotine. Kako bi joj se povećala viskoznost, u isplaku se dodaju gline ili polimeri. Najpoznatije i najčešće korištene gline su bentonit i atapulgite, dok se od polimera najčešće koriste guar – guma, ksantan – guma i celulozni polimeri. Za smanjenje viskoznosti koriste se razrjeđivači i dispergatori (tanini, ligniti, lignosulfonati). Prevelika filtracija može dovesti do raznih problema za vrijeme izrade bušotine te ju je u takvim slučajevima potrebno smanjiti. Kao aditivi za smanjenje filtracije najčešće se koristi škrob, smole, polianionske celuloze i natrijev poliakrilat. Osim navedenih aditiva, postoje još specijalni materijali koji se dodaju u isplaku, kao npr. antipjenušavci, materijali za čepljenje mjesta gubitaka isplake, emulgatori, podmazivači i drugi.

## 6. ZAŠTITNE CIJEVI

Kao za svaku prethodnu (i sljedeću) fazu projektiranja, tako je i za dizajniranje zaštitnih cijevi potrebno odrediti ulazne podatke: vrste i svojstva bušotinskog fluida, faktor trenja, kretanja tlaka, nestabilne naslage, kritični kut otklona kanala bušotine, potrebne gustoće bušotinskog fluida za pojedine sekcije, karakteristike stijena u razini pete kolone zaštitnih cijevi, promjer bušotine i proizvodnih zaštitnih cijevi, plan opremanja i stimulacije bušotine te izoliranje pojedinih proizvodnih intervala.

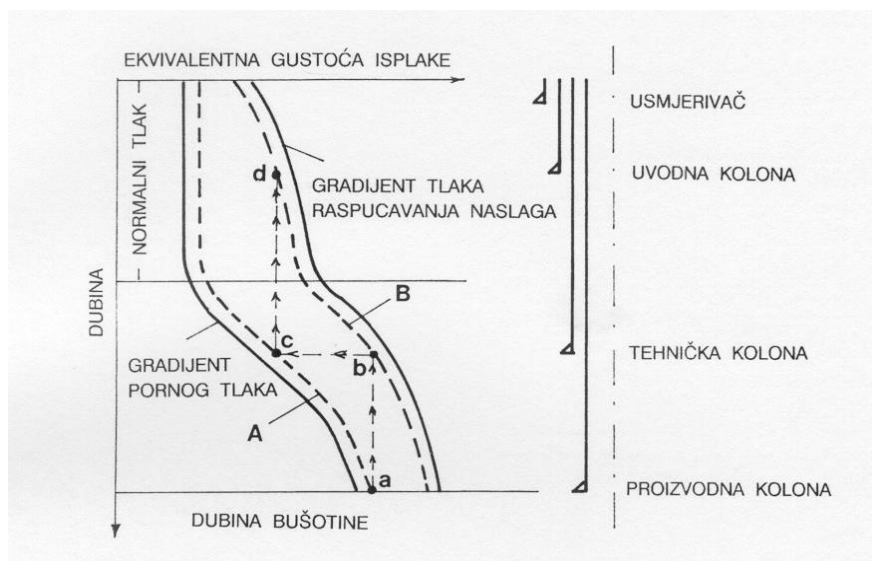
### 6.1. Određivanje dubina dna kolona zaštitnih cijevi

Prvi korak u pripremi konstrukcije zacjevljenja je odabir dubina do kojih će se zaštitne cijevi ugraditi. Posljedice preplitke ili preduboke ugradnje kolona zaštitnih cijevi mogu biti veliki problemi tijekom izrade kanala bušotine (kao npr. erupcije, zarušavanja, gubljenja optoka fluida, diferencijalni prihvat, hidrauličko raspucavanje naslaga, ograničene mogućnosti tehnoloških rješenja i slično), što znatno poskupljuje ukupnu cijenu koštanja bušotine, a i sigurnost izrade dovodi se u pitanje. Odabir dubina smještanja dna kolona zaštitnih cijevi vrši se od dna prema ušću bušotine, odnosno od najdublje prema najplićoj koloni zaštitnih cijevi. U razmatranje treba uključiti niz čimbenika, poput poznavanja temeljnih geoloških uvjeta, posebnih problema u bušotini, unutrašnje politike poduzeća i, u puno slučajeva, zakonske regulative koji će pomoći u odlučivanju gdje se moraju smjestiti dna kolona zaštitnih cijevi, a da bismo se osigurali da će se bušenje nastaviti uz najmanje poteškoća.

Odabir dubine ugradnje pete kolone temelji se na poznavanju vrijednosti pornog tlaka i tlaka raspucavanja naslaga. Vrlo je čest i praktičan prikaz kretanja tih tlakova u obliku gradijenata gdje oni predstavljaju odnose pornog tlaka i tlaka raspucavanja naslaga s dubinama njihovog zalijeganja.

Krivulja A na slici 6-1. predstavlja krivulju gradijenta hidrostatskog tlaka koji ostvaruje potrebna gustoća isplake tijekom bušenja. Takva je margina iznad predviđenog pornog tlaka potrebna da bi se svladali tlakovi klipovanja koji se manifestiraju smanjenjem efektivne gustoće isplake tijekom kretanja niza u bušotini prema gore. Uobičajena vrijednost margine koja će jamčiti sigurno vađenje cijevnog alata iz bušotine, uz

pravovremeno dopunjavanje bušotine isplakom, iznosi oko  $60 \text{ kg/m}^3$ , odnosno onoliko koliko je potrebno da se osigura tlak na dno za oko 1,5 do 3,5 MPa veći od pornog tlaka.



**Slika 6-1.** Određivanje dubina peta kolona zaštitnih cijevi na temelju gradijenata pornog tlaka i tlaka raspucavanja naslaga (Krištafor, 2009)

Krivulja B dobije se tako da se krivulja gradijenta tlaka raspucavanja naslaga umanjuje za vrijednost koja omogućava gušenje bušotine bez hidrauličkog raspucavanja naslaga. Veličina margine koja prati krivulju gradijenta tlaka raspucavanja ovisi o obujmu i vrsti slojnog fluida doteklog u kanal bušotine te o odabranoj metodi gušenja, a obično ima istu veličinu kao i margina za svladavanje tlakova klipovanja. Krivulja B važna je i za stajališta kolebanja tlakova koji su posljedica spuštanja cijevi u bušotinu, a koji također mogu uvjetovati raspucavanje naslaga.

Da bi se doseгла projektirana dubina potrebno je upotrijebiti gustoću isplake koju definira točka "a" na slici i koja djelotvorno sprečava dotjecanje formacijskog fluida u bušotinu. Međutim, zadržavanje navedene gustoće isplake neće prouzročiti raspucavanje najslabijih raskrivenih naslaga u kanalu bušotine sve dotle dok se tehnička kolona proteže barem do točke "b", u kojoj je gradijent tlaka raspucavanja jednak gustoći isplake potrebnoj za bušenje do točke "a". Na isti način, za bušenje do točke "b" i smještanje dna tehničke kolone bit će potrebna gustoća isplake naznačena točkom "c". Ta će gustoća odrediti dubinu Pete ulodne kolone barem do dubine točke "d". Opisani postupak načelno je valjan i daje okvirna mjesta dubine ugradnje Pete pojedinih tipova zaštitnih cijevi. Na

određivanje konačne dubine ugradnje utječu i drugi čimbenici te dodatni kriteriji koji ne moraju biti isti za sve tipove zaštitnih cijevi.

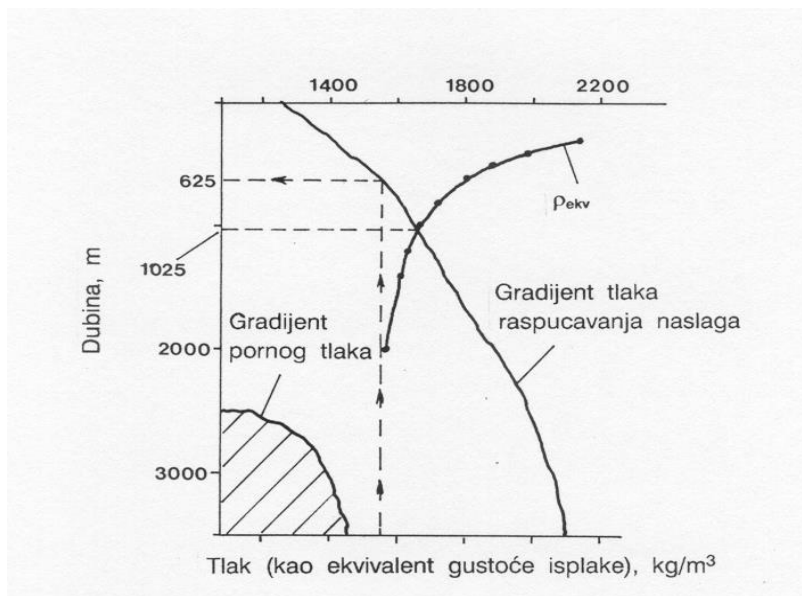
#### 6.1.1. Određivanje dubine dna međukolone

Prvi kriterij za određivanje dubine dna kolone zaštitnih cijevi je svladavanje ležišnih tlakova isplakom određene gustoće, a da se pritom ne raspucaju pliće naslage. Taj se postupak provodi od dna prema vrhu. Nakon što su te dubine određene, razmatra se mogućnost prihvata zbog diferencijalnog tlaka kako bi se spriječio diferencijalni prihvati zaštitnih cijevi tijekom njihovog spuštanja u bušotinu. Ta se razmatranja provode od vrha prema dnu. Do prihvata najčešće dolazi u području najvećeg diferencijalnog tlaka, što se najčešće javlja na prijelazu u zone s većim tlakom. Ispitivanja su pokazala da se mogu tolerirati diferencijalni tlakovi vrijednosti 14 - 16 MPa za područja normalnog tlaka i vrijednosti 21 - 23 MPa za područja povećanog (nenormalnog) tlaka. U slučaju da je vrijednost diferencijalnog tlaka veća od dozvoljene, pokusna se dubina definira kao dubina dna najpliće moguće ugrađenog lajnera, a nova dubina dna međukolone se određuje proračunom.

#### 6.1.2. Određivanje dubine dna uvodne kolone

Nizovi zaštitnih cijevi koji se ugrađuju plitko često su izloženi tlakovima kojima treba pristupiti s većom pažnjom nego onima kod razmatranja odabira dubina dna tehničkih kolona i lajnera. Zbog toga je odabiranje dubina dna uvodnih kolona ispravnije provoditi obzirom na tlakove mogućih erupcija fluida nego u skladu s postupcima za tehničke kolone i lajnere. Cilj postupka određivanja dubine dna uvodne kolone, u svrhu izbjegavanja podzemne erupcije, biti će odabir dubine na kojoj će naslage moći pouzdano izdržati realne tlakove pri nadzoru pritjecanja fluida u bušotinu. U terenskoj praksi postoji dokazani iterativni postupak (slika 6-2.) koji brzo i djelotvorno procjenjuje tlakove erupcije. Uz poznate veličine gradijenta tlaka raspucavanja naslaga, proračunom se može odrediti dubina ugradnje uvodne kolone na kojoj će stijene imati dovoljnu čvrstoću obzirom na tlakove erupcije. Odabire se mala dubina za koju se određuje gradijent tlaka raspucavanja naslaga i ekvivalentna gustoća isplake. Ako je ekvivalentna gustoća isplake veća od gradijenta tlaka raspucavanja, mora se odabrati dublji razmak i proračun ponoviti. Postupak se ponavlja sve dotle dok gradijent tlaka raspucavanja ne bude veći od tlaka koji

ostvaruje ekvivalentna gustoća isplake. Presjecište dobivene krivulje ekvivalentnih gustoća isplake s krivuljom gradijenta tlaka raspucavanja naslaga daje dubinu dna uvodne kolone.



**Slika 6-2.** Odabir dubine dna uvodne kolone (Krištafor, 2009)

### 6.1.3. Određivanje dubine dna usmjerivača

Dubine dna kolona zaštitnih cijevi koje se ugrađuju u bušotinu prije uvodne kolone uglavnom ovise o potrebi saniranja problema koji mogu nastati tijekom bušenja, zaštiti samog ušća, a ponekad i o lokalnoj zakonskoj regulativi. Konsolidiranje nevezanih naslaga, plitko zaliježuća mjesta znatnih gubljenja isplake ili zaštita vodonosnih pijesaka mogu biti neki od ciljeva određivanja mjesta ugradnje dna usmjerivača. U domaćoj praksi bušenja na kopnu sve navedene probleme uglavnom rješava relativno plitko ugrađena uvodna kolona.

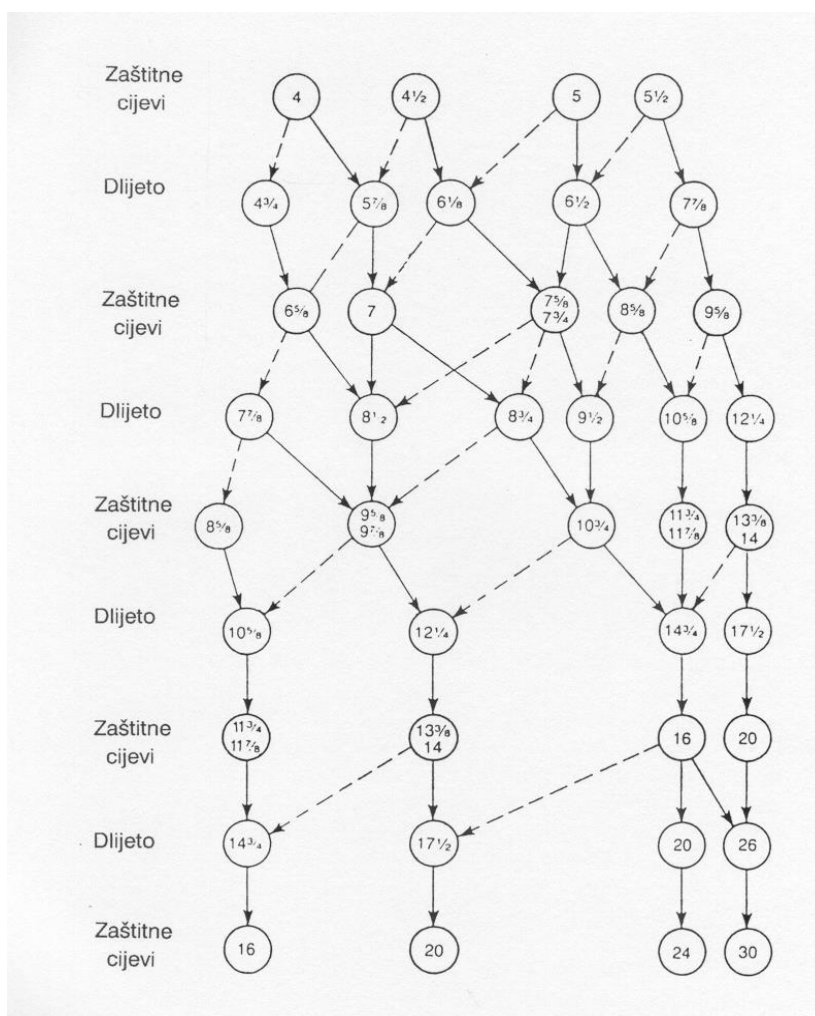
## 6.2. Odnosi promjera dlijeta i zaštitnih cijevi

Odabir promjera dlijeta i zaštitnih cijevi može predstavljati razliku između bušotine koju je potrebno napustiti prije proizvodnog opremanja i uspješno izrađene, ekonomski isplative bušotine. Kod samog odabira, potrebno je razmotriti sljedeće:

- unutarnji i vanjski promjer zaštitnih cijevi,
- promjer spojnice zaštitnih cijevi i
- promjer dlijeta.

Konstruktivski kriteriji mogu zahtijevati teže zaštitne cijevi, odnosno cijevi deblje stijenke. Time se smanjuje unutarnji promjer zaštitnih cijevi, kao i prohodnost. Prohodnost određuje promjer alata, prvenstveno dlijeta, koji se kroz zaštitne cijevi spušta u bušotinu i manji je od unutarnjeg promjera same cijevi. U nekim slučajevima, prohodnost može biti i glavni kriterij po kojem se vodi za vrijeme projektiranja geometrije kanala bušotine. Spojnice se odabiru na način da zadovoljavaju uvjete otpornosti na napuhavanje, sažimanje i vlačna naprezanja te da omogućuju učinkovito brtvljenje.

Odabir dlijeta za bušenje pojedinih dionica uvjetovan je promjerom zaštitnih cijevi. Dlijeta su dostupna u velikom broju i rasponu veličina (promjera). Kako bi se pojednostavio izbor dlijeta i zaštitnih cijevi, konstruiran je dijagram koji omogućuje njihov odabir za ispunjenje većine zahtjeva koje postavlja projekt bušotine (slika 6-3.).



**Slika 6-3.** Dijagram odabira zaštitnih cijevi i dlijeta (Adams, 1985)

Pune linije označuju uobičajeno korištena dlijeta za taj promjer zaštitnih cijevi, a crtkane linije ukazuju na manje uobičajene promjere bušotina.

### 6.3. Odabir zaštitnih cijevi

Nakon što se odrede broj, promjeri i dubina ugradnje pojedinih nizova zaštitnih cijevi, pristupa se određivanju debljina stijenki, kvalitete čelika i vrste spojnica. Koncept tzv. "najvećeg očekivanog opterećenja" je možda najrašireniji postupak dizajniranja zaštitnih cijevi u suvremenoj praksi bušenja. To je grafičko-analitički postupak određivanja kombiniranog sastava zaštitnih cijevi koji za specifične uvjete predstavlja najekonomičniji ili najsigurniji odabir. Zaštitne cijevi odabiru se s obzirom na rasprskavanje, gnječenje, uzdužna opterećenja i kombiniranja opterećenja.

Najprije se utvrđuju uvjeti naprezanja na rasprskavanje i pokusno se odabiru najjeftinije zaštitne cijevi koje su istodobno otporne na djelovanje unutrašnjeg tlaka na bilo kojoj dubini. Nakon toga definira se naprezanje na gnječenje i pokusno odabrane zaštitne cijevi procjenjuju se obzirom na otpornost na djelovanje vanjskog tlaka. Ako bilo koji dio niza pokusnog kombiniranog sastava zaštitnih cijevi ne udovoljava granicama naprezanja na gnječenje, povećavaju mu se kvaliteta ili jedinična težina do dovoljne otpornosti na djelovanje vanjskog tlaka. Zatim slijedi provjera pokusnog kombiniranog sastava obzirom na uzdužna opterećenja. Kao i kod provjere otpornosti na gnječenje, svaka poddimenzionirana sekcija zamjenjuje se zaštitnim cijevima veće gradacije. Završni korak odabira je provjera s obzirom na kombinirana opterećenja. Ako se opet pokaže da je čvrstoća neke sekcije kombiniranog sastava manja od mogućih naprezanja, tom se dijelu niza mora ponovno povećati gradacija.

Prva kolona koja se obično projektira je uvodna kolona. Projekt obuhvaća sve postupke za odabir kombiniranog sastava uključujući unutarnji i vanjski tlak te uzdužna i kombinirana opterećenja. Za razliku od postupka odabira ostalih tipova zaštitnih cijevi, čiji odabir obično određuje naprezanje na rasprskavanje, odabir uvodne kolone ovisi o naprezanjima na rasprskavanje i gnječenje.

Odabir tehničke kolone je temeljen na principima različitim od onog za uvodne kolone, odnosno mijenja se filozofija odabira linija dizajna zaštitnih cijevi za unutrašnji i vanjski tlak. Prva je pretpostavka osigurati pristup najnepovoljnijeg slučaja. Najveće naprezanje zaštitnih cijevi na rasprskavanje ostvaruje se tijekom erupcije kod koje je karakteristično prisustvo dva ili više fluida u bušotini. Budući da se računa s



najnepovoljnijim uvjetima, u razmatranje se uzima isplaka najveće gustoće koja se upotrebljava ispod tehničke kolone i plin kao fluid koji je ušao u bušotinu. Zaštitne cijevi moraju pritom izdržati tlak erupcije fluida, tlak injektiranja na dnu niza i najveće površinske tlakove na vrhu niza. Odabir zaštitnih cijevi obzirom na gnječenje, uzdužna i kombinirana opterećenja identičan je kao i za uvodnu kolonu.

Odrednice koncepta najvećeg očekivanog opterećenja primijenjene na proizvodnu kolonu nešto se razlikuju od pristupa za druge tipove nizova zaštitnih cijevi. Razlike se odnose na faktore sigurnosti za unutrašnji i vanjski tlak kao i na fluide koji uzrokuju naprezanja na rasprskavanje.

S obzirom da različiti uvjeti tijekom bušenja i varijacije geološke građe mogu uzrokovati dodatna naprezanja u zaštitnim cijevima, nije moguće uvijek koristiti standardne postupke dizajniranja, nego ih je potrebno modificirati sukladno uvjetima u bušotini.

Prilikom spuštanja kolone zaštitnih cijevi dolazi do kolebanja tlaka u bušotini, odnosno njegovog povećanja. Što je veća brzina spuštanja zaštitnih cijevi, veći je i tlak u bušotini. S obzirom da tlak u bušotini ne smije premašiti vrijednost tlaka raspucavanja naslaga, potrebno je odrediti maksimalnu dozvoljenu brzinu spuštanja zaštitnih cijevi.

## 7. NIZ BUŠAĆIH ALATKI I OPREMA UŠĆA BUŠOTINE

### 7.1. Niz bušaćih alatki

Bitni podaci za uspješan odabir niza bušaćih alatki i opreme ušća bušotine uključuju: vrste i svojstva bušotinskog fluida, koeficijent trenja, litološke podatke, rasjede i nagibe slojeva, promjere i dubine ugradnje kolona zaštitnih cijevi, dubinu bušotine (mjerenu i stvarnu), točku skretanja i kut otklona bušotine, intezitet nagle promjene otklona kanala bušotine te azimut bušotine.

Niz bušaćih alatki je bitan dio sustava za izradu bušotine, jer predstavlja poveznicu između postrojenja na ušću i dlijeta na dnu bušotine. Kao takav, mora omogućiti protok bušotinskog fluida do dna bušotine i prijenos okretnog momenta na dlijeto, te mora ostvariti potrebno opterećenje na dlijeto. Za vrijeme izrade projekta, niz bušaćih alatki može se promatrati kao dvije zasebne cjeline: dubinski sklop alatki (*eng. Bottom Hole Assembly – BHA*) i niz bušaćih šipki iznad dubinskog sklopa alatki.

#### 7.1.1. Dubinski sklop alatki

Dubinski sklop alatki mora biti projektiran tako da ostvaruje dostatno opterećenje na dlijeto, omogući stabilan rad dlijeta uz minimalne vibracije i svede na minimum tendenciju skretanja kanala bušotine. Dubinski sklop alatki sastoji se od dlijeta i teških šipki, a može sadržavati i teške bušaće šipke, proširivače, stabilizatore i dubinske motore, kao i posebne uređaje za mjerenja tijekom bušenja (Taher Hamdani, 2014). Teške bušaće šipke se dodaju između teških i bušaćih šipki kako bi se smanjio broj teških šipki koje su skuplje, te kako bi se smanjila mogućnost loma alatki na prijelazu između teških i bušaćih šipki zbog razlike u njihovim promjerima. Iako teške bušaće šipke imaju jednak promjer kao bušaće šipke, njihova debljina stijenke je znatno veća, te se na taj način smanjuje torzija alatki na dnu bušotine. Stabilizatori se postavljaju neposredno iznad dlijeta na teške šipke kako bi se prvenstveno povećala krutost alatki i spriječio otklon kanala bušotine. S obzirom na sastav alata i raspored stabilizatora, postoji nekoliko tipova dubinskog sklopa alatki koji se koriste za različite potrebe. Dubinski sklop koji radi na principu njihanja koristi se za smanjenje otklona kanala bušotine na način da se ukloni stabilizator koji je najbliže dlijetu. Kruti dubinski sklop sadrži tri do pet stabilizatora u određenom rasporedu i služi za održavanje

smjera kanala bušotine. Rotacijski dubinski sklop alatki može povećavati, smanjivati ili održavati kut otklonjene bušotine, što također ovisi o rasporedu stabilizatora. Kada se želi skrenuti kanal bušotine, može se koristiti dubinski sklop s dubinskim motorom i kosim prijelazom ili dubinski sklop s upravljivim dubinskim motorom. U prvom slučaju, dubinski motori postavljaju se iznad dlijeta, dok se kosi prijelaz nalazi između dubinskog motora i najniže teške šipke. Za dubinski sklop s upravljivim dubinskim motorom je karakteristično da se njime upravlja s površine. Dubinski motori se pokreću strujom isplake i omogućuju rotaciju dlijeta bez okretanja niza alatki koje se nalaze iznad motora.

#### 7.1.2. Teške i bušaće šipke

Kod odabira teških šipki, rade se proračuni otpornosti šipki na uzdužna naprezanja te se odabiru unutarnji i vanjski promjer koji će omogućiti nesmetanu cirkulaciju isplake. Također se mora odrediti potrebna duljina niza teških šipki tako da oko 75% njegove težine ostvaruje potrebno opterećenje na dlijeto, a oko 25% težine drži bušaće šipke opterećene na vlak. Za odabir bušaćih šipki rade se proračuni otpornosti šipki na gnječenje, vlak i savijanje prije određivanja kvalitete čelika i unutarnjeg i vanjskog promjera za sve intervale kanala bušotine. Također je potrebno odrediti ukupnu duljinu bušaćih i teških šipki koje će se koristiti za izradu kanala bušotine.

### 7.2. Oprema ušća bušotine

Nakon odabira niza bušaćih alatki, započinje projektiranje bušotinske glave i protuerupcijskog sustava. Za njihov odabir potrebno je znati promjer bušotine i proizvodnih zaštitnih cijevi, plan opremanja i stimulacije bušotine, vrste i aditive bušotinskog fluida, promjere i broj nizova zaštitnih cijevi, kretanja tlaka te temperature podzemlja.

#### 7.2.1. Bušotinska glava

Bušotinska glava je dio bušotinske opreme koji se nalazi između erupcijskog sustava i vrha kolone zaštitnih cijevi. Obično se sastoji od vješalica kolona zaštitnih cijevi, vješalice tubinga, glavnog ventila, bočnog ventila i ventila za automatsko zatvaranje bušotine, a također može imati i ventil za regulaciju protoka ili sapnicu. Osnovna funkcija bušotinske

glave je omogućavanje vješanja kolona zaštitnih cijevi i proizvodnog niza, stoga se projektom bušotine odabire bušotinska glava koja će osigurati njihovo pouzdano vješanje. Također, bušotinska glava osigurava brtvljenje svih kolona zaštitnih cijevi na ušću bušotine i praćenje tlaka u prstenastom prostoru između različitih kolona zaštitnih cijevi i tubinga ([www.wipertrip.com](http://www.wipertrip.com)). Bušotinska glava mora biti sposobna podnijeti radne tlakove u bušotini pa se očekivani radni tlakovi uzimaju kao bitan kriterij pri njihovom odabiru.

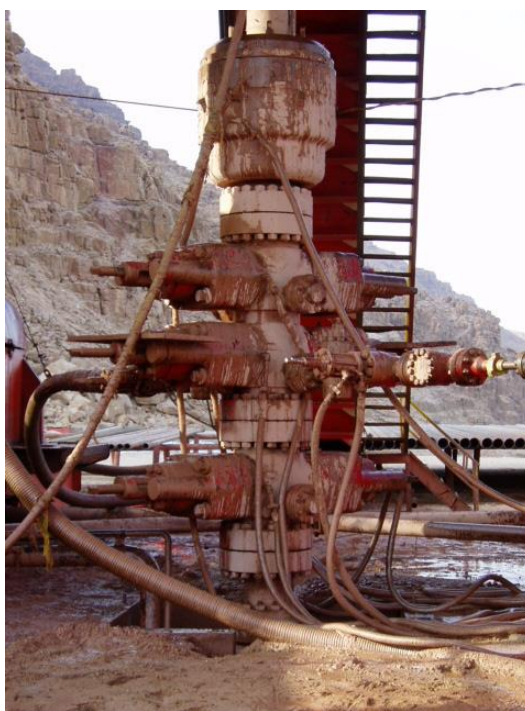
#### 7.2.2. Protuerupcijski sustav

Na bušotinsku glavu postavlja se protuerupcijski sustav, koji služi za zatvaranje bušotine kada zakaže primarna kontrola tlaka, odnosno kada hidrostatski tlak isplake ima manju vrijednost od potrebne. Protuerupcijski sustav mora zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- zatvaranje ušća bušotine,
- omogućavanje otpuštanja fluida iz bušotine,
- omogućavanje utiskivanja fluida u bušotinu,
- kretanje bušačkog alata u bušotini pod tlakom i
- osiguranje zamjene dijelova opreme u slučaju kvarova.

Uređaji za zatvaranje bušotine nazivaju se preventeri i dijele se na dva tipa: prstenasti (anularni) i čeljusni. Gotovo uvijek se za osiguranje ušća koriste obje vrste preventera u kombinaciji. Svrha prstenastih preventera je brtvljenje oko alata u bušotini, ali neki tipovi prstenastih preventera imaju mogućnost kompletnog zatvaranja prazne bušotine. Glavni dio ovakvog preventera je uložak od sintetičke gume koji je armiran i pojačan čeličnim ulošcima. Zatvara se oko bilo kojih šipki u bušotini i potpuno zatvara prstenasti prostor. Kroz gumeni uložak omogućeno je spuštanje i vađenje alatki pod tlakom. Prstenasti preventeri se otvaraju i zatvaraju isključivo hidraulički, te se ne mogu zatvarati ručno. Čeljusni preventeri, za razliku od prstenastih, imaju samo jednu funkciju: zatvaranje i brtvljenje oko samo jednog promjera šipki. Svaka čeljust ima polukružni otvor čiji promjer odgovara promjeru bušačkih šipki. Čeljusti su izmjenjive i mogu se mijenjati da brtve oko svakog promjera šipki. Ako se koristi kombinirani niz bušačkih šipki potrebno je ugraditi dodatni preventer s odgovarajućim čeljustima, a može se upotrijebiti i čeljusni preventer podesivog promjera. Ova vrsta čeljusnog preventera učinkovito zatvara prstenasti prostor oko cijevnog alata ukoliko je njegov nominalni promjer unutar raspona promjera oko kojeg preventer zatvara. Osim čeljusti za šipke, u čeljusne preventere se ugrađuju čeljusti za puni

profil, koje zatvaraju bušotinu kada alatke nisu u bušotini, i čeljusti za rezanje, koje će brtviti puni profil nakon rezanja šipki. Svi čeljusni preventeri se mogu zatvarati ručno i hidraulički. Osim preventera, kao dio opreme za osiguranje ušća, koriste se i diverteri. Oni služe za skretanje eventualnog dotoka fluida iz bušotine dalje od tornja. Konstrukcija divertera je ista kao i kod prstenastog preventera, razlikuju se u veličini, odnosno diverter ima veće dimenzije. Iz tog razloga se diverteri koriste u slučajevima kada je potrebno upotrijebiti dlijeto čiji je promjer prevelik za bilo koji preventerski sklop (slika 7-1.). Potrebno je poznavati vrijednost radnog tlaka svih preventera kako bi se preventeri mogli zatvoriti u propisanom vremenu.



**Slika 7-1.** Preventerski sklop (<http://www.iwcfdrillengineer.com>)

Sastavni dio svakog protuerupcijskog sustava je hidraulička jedinica za zatvaranje, koja mora zatvoriti bilo koji preventer u propisanom vremenu (vrijeme zatvaranja preventera ovisi o njegovom promjeru i o lokaciji bušotine – kopno ili more). Otvaranje i zatvaranje protuerupcijskih uređaja obavlja se pomoću akumulatorskih spremnika u kojima se nalaze hidraulički fluid pod tlakom i gumena komora s komprimiranim dušikom. Hidraulički fluid se utiskuje u posudu ispod gumene komore te se dušik komprimira dok se ne postigne potreban tlak. Kada treba zatvoriti preventer, nakon otvaranja ventila komprimirani dušik ekspandira i potiskuje hidraulički fluid iz posude. Iskoristivi volumen hidrauličkog fluida ovisi o odnosu između tlaka predpunjenja i radnog tlaka.

## 8. ČIŠĆENJE KANALA BUŠOTINE I CEMENTACIJA

Kako bi se moglo pristupiti dizajniranju hidrauličkog sustava, potrebno je znati niz parametara vezanih uz bušotinski fluid (vrste i svojstva), stabilnost kanala bušotine (nestabilne formacije, proširenja kanala bušotine, gradijenti slojnog i tlaka raspucavanja naslaga), putanju bušotine (mjerena dubina, zahtjevi za praćenje putanje bušotine, kut otklona), zaštitne cijevi (promjeri i dubine ugradnje zaštitnih cijevi), niz bušaćih alatki (duljine i promjeri nizova, udio kanala bušotine koji se izrađuje rotacijskim načinom) te uz bušaća dlijeta (promjeri bušotine i dlijeta, očekivana brzina bušenja).

### 8.1. Hidraulički sustav

Hidraulika je znanstvena disciplina koja proučava oblike i zakone mehaničkog gibanja i relativnog mirovanja tekućina. U naftnom rudarstvu izraz hidraulički sustav odnosi se na bušotinski fluid, odnosno isplaku (isplachni sustav) kada je ona u statičkom ili dinamičkom stanju. Isplaka je u statičkom stanju kada miruje u bušotini, a u dinamičkom stanju kada cirkulira kroz bušaće alatke i prstenasti prostor. S obzirom da se hidraulički sustav odnosi na isplaku, njihovi se zadaci često ne razlikuju. Hidraulički sustav ima aktivnu ulogu tijekom izrade kanala bušotine te njegov pravilan dizajn i održavanje mogu ubrzati bušenje i na taj način smanjiti ukupne troškove. Projektom hidrauličkog sustava za svaku dionicu bušotine moraju biti definirane uzlazne brzine isplake i dobave sisaljki koje će ostvariti uspješno čišćenje kanala bušotine te potrebna snaga sisaljki koja će takve dobave osigurati. Također je potrebno u svakom trenutku znati vrijednost tlaka na manometru stojke. Kako bi se pravilno projektiralo hidraulički sustav potrebno je razmotriti nekoliko parametara.

#### 8.1.1. Hidrostatski tlak

Hidrostatski tlak isplake je ključni parametar održavanja kontrole tlaka u bušotini i sprečavanja dotoka i erupcija. Definiran je kao tlak stupca fluida, odnosno kao funkcija gustoće isplake i stvarne vertikalne dubine (*eng. True Vertical Depth - TVD*). Gradijent tlaka može se izraziti pomoću ekvivalentne gustoće isplake (*eng. Equivalent Mud Weight - EMW*) koja predstavlja sumu hidrostatskog, cirkulacijskog i površinskog tlaka na određenoj dubini, a izražava se kao težina statične isplake koja bi očitovala jednak tlak na

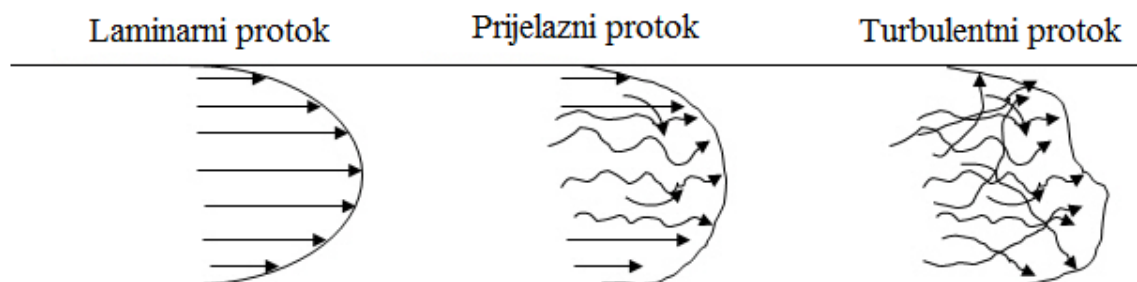
toj dubini. Još jedan termin koji se često koristi je ekvivalentna gustoća isplake u cirkulaciji (eng. *Equivalent Circulating Density - ECD*), a predstavlja gustoću isplake čiji bi stupac ostvario tlak jednak sumi hidrostatskog tlaka i tlaka koji nastaje kao posljedica trenja pri protjecanju isplake prstenastim prostorom. Samim time, ekvivalentna gustoća isplake u cirkulaciji (*ECD*) je veća od ekvivalentne gustoće isplake (*EMW*), i to najčešće u rasponu od 12 – 60 kg/m<sup>3</sup> (Gaurina-Međimurec, 2010). Potrebno je odrediti vrijednosti gustoće isplake (*EMW* i *ECD*) za svaku dionicu bušotine.

#### 8.1.2. Uzgon

Uzgon je sila koja djeluje na sva tijela uronjena u fluid, a nastaje uslijed razlike hidrostatskih tlakova koji djeluju na donji i gornji dio tijela. Tijelo koje je uronjeno u fluid zbog uzgona je manje težine nego isto tijelo na zraku, pa se na taj način smanjuje težina alata, odnosno opterećenje na kuki. Uzgon je funkcija gustoće čelika i gustoće isplake, a odnos gustoće isplake i uzgona je proporcionalan, tj. što je veća gustoća isplake, veći je i uzgon.

#### 8.1.3. Tip protjecanja

Za vrijeme protjecanja, fluid se može različito ponašati, odnosno može se kretati različitim tipovima (režimima) protjecanja. Uobičajeni tipovi kojima isplaka protječe su laminarni, turbulentni i prijelazni tip protjecanja (slika 8-1.). Najčešći tip protjecanja je laminarni. Kod takvog tipa protjecanja fluid se kreće u slojevima, a brzina slojeva je veća u središtu (šipki ili prstenastog prostora) nego uz stijenkku. Javlja se od najmanjih dobava sisaljki sve do dobava pri kojima počinje turbulentni tip protjecanja. Pri laminarnom protjecanju ostvaruju se manji padovi tlaka i manje se oštećuje kanal bušotine, ali su zato izraženiji problemi s čišćenjem kanala bušotine. Turbulentni tip protjecanja se javlja kada se s povećanjem brzine protjecanja narušavaju slojevi fluida i dolazi do pojave vrtloženja u struji fluida. Takav tip protjecanja najčešće se pojavljuje pri protjecanju kroz alatke te ponekad oko teških šipki. U odnosu na laminarni tip protjecanja, pri turbulentnom protjecanju povećani su padovi tlaka i oštećenje kanala bušotine zbog kontinuiranog sudaranja struje isplake sa stijenkaama te zbog veće brzine strujanja uz stijenke. Prijelazni tip protjecanja javlja se nakon promjene uvjeta protjecanja, a prije uspostavljanja novih uvjeta protjecanja.



**Slika 8-1.** Tipovi protjecanja (<http://www.drillingformulas.com>)

Postoji nekoliko uobičajenih metoda za određivanje kriterija za turbulenciju (presjecište krivulja tlak – dobava za laminarno i turbulentno protjecanje, određivanje  $Z$  – faktora, određivanje Reynoldsov-og broja). U naftnoj industriji se isključivo koristi Reynolds-ov broj. Kritični Reynolds-ov broj, kod kojeg se javlja turbulentno protjecanje, razlikuje se za različite reološke modele fluida.

#### 8.1.4. Reološki model

Reološki model je opis odnosa između smičnog naprezanja fluida i smične brzine, a služi za opisivanje ponašanja fluida u dinamičkim uvjetima. Smična brzina je odnos razlike brzina između dva priležeća sloja i udaljenosti između ta dva sloja, a smično naprezanje predstavlja silu na jedinicu površine laminarnog sloja koja uzrokuje smicanje. Prema odnosu smičnog naprezanja i smične brzine fluidi se dijele na Newtonove (voda, lagana nafta) i ne-Newtonove (isplaka, cementna kaša), a ne-Newtonovi fluidi se dijele na Binghamove plastične i pseudoplastične. Reološki model se može upotrijebiti za izračunavanje pada tlaka zbog trenja, promjene tlaka prilikom spuštanja ili izvlačenja alatki iz bušotine i brzinu klizanja krhotina. Modeli koji se koriste u naftnoj industriji su Newtonov, Binghamov plastični i eksponencijalni model. Za opisivanje reoloških svojstava isplake najčešće se koriste Binghamov plastični model i eksponencijalni model. Binghamov plastični model najbolje opisuje fluid pri većim smičnim brzinama, dok eksponencijalni model bolje opisuje ponašanje isplake pri malim smičnim brzinama. Reološka svojstva isplake izravno utječu na padove tlaka u cirkulacijskom sustavu pa je zbog toga bitno odabrati pravilni matematički model protjecanja.



#### 8.1.5. Hidraulička snaga na dlijeto

Optimiranje hidrauličke snage na dlijeto je vrlo bitno za što uspješnije čišćenje dna bušotine. Kako bi se to postiglo, optimiraju se određene hidrauličke varijable dlijeta: udarna sila mlaza, hidraulička snaga na dlijeto i brzina mlaza. Udarna sila mlaza daje ukupnu silu koju na dno kanala bušotine ostvaruje fluid protjećući kroz mlaznice. Laboratorijska i terenska istraživanja pokazala su da je poprečno kretanje isplake ispod dlijeta najdjelotvorniji parametar kod čišćenja dna, a poprečno kretanje isplake doseže maksimum kada je udarna sila mlaza maksimalna. U pravilu se dobro čišćenje dna ostvaruje kada se na dlijetu koristi između 50 – 65% raspoloživog tlaka (Gaurina-Međimurec, 2010).

#### 8.1.6. Kolebanje tlakova

Kolebanje tlakova tijekom kretanja cijevi u bušotini predstavlja promjenu tlaka prilikom spuštanja ili izvlačenja alatki. Tlak pulziranja je tlak izazvan kretanjem alatki prema dolje i izaziva povećanje ukupnog tlaka na dno bušotine, a tlak klipovanja je tlak izazvan kretanjem alatki prema gore i smanjuje ukupni tlak na dno bušotine. Tlak izazvan kretanjem alatki ovisi o svojstvima isplake, veličini prstenastog prostora, brzini kretanja alatki i duljini niza alatki. Brzina spuštanja i izvlačenja alatki mora biti ograničena i kontrolirana kako ne bi došlo do raspucavanja naslaga kod spuštanja alatki ili dotoka fluida u bušotinu kod izvlačenja alatki.

### 8.2. Cementacija

Cementacija je nužna operacija za uspješnu izradu bušotine. Svrha cementacije je učvršćivanje zaštitnih cijevi u kanalu bušotine i onemogućavanje migracije fluida između slojeva (Mian, 1992). Prije samog projektiranja cementacije obavezno je imati saznanja o promjeru bušotine, planu opremanja i stimulacije bušotine, izoliranju pojedinih proizvodnih intervala, kretanju tlaka, temperaturi podzemlja, prisutnosti akvifera, vrstama i svojstvima bušotinskog fluida, potrebnim gustoćama bušotinskog fluida za pojedine sekcije, problematičnim formacijama te o kutu otklona i intezitetu nagle promjene otklona kanala bušotine. Postoje tri vrste cementacije: primarna cementacija, popravna cementacija i ugradnja cementnih mostova.

Primarna cementacija je utiskivanje cementne kaše (mješavina cementa, vode i aditiva) u prstenasti prostor između zaštitnih cijevi i stijenki kanala bušotine. Provodi se od dna bušotine do njenog ušća ili do određene željene dubine. Utiskivanje cementne kaše se obavlja kroz zaštitne cijevi ili uz pomoć bušačih šipki, a može se izvoditi u jednom ili više stupnjeva (ako su za cementiranje potrebne cementne kaše različitih svojstava ili ako prostor između cementiranih intervala treba ostati necementiran). Popravna cementacija (*eng. squeeze cementing*) je cementacija pod tlakom, a izvodi se u slučaju neuspjele primarne cementacije. Cementna kaša se najčešće protiskuje u područje loše obavljene primarne cementacije, koje je izolirano, te se primjenom tlaka s površine utiskuje u željeno područje. Cementni mostovi se ugrađuju pri napuštanju bušotine ili napuštene zone i moraju osigurati sprečavanje protoka fluida u bušotini, odnosno hidrauličko i mehaničko brtvljenje. Također se mogu postaviti i za skretanje kanala bušotine.

Kod projektiranja cementacije potrebno je poznavati neke (i uzeti u obzir već poznate) bušotinske parametre koji utječu na njenu uspješnost. Trebaju biti poznate različite temperature u bušotini: statička temperatura na dnu bušotine (*eng. Bottom Hole Static Temperature - BHST*), temperatura u optoku na dnu bušotine (*eng. Bottom Hole Circulating Temperature - BHCT*) i razlika temperatura vrha i dna stupca cementne kaše. Statička temperatura na dnu bušotine utječe na tlačnu čvrstoću cementnog kamena, dok temperatura u optoku na dnu bušotine utječe na vrijeme zgušćavanja, reološka svojstva i vrijeme vezivanja cementne kaše. Razlika temperatura vrha i dna cementne kaše posebno dolazi do izražaja kada se cementira veliki interval i kada je ta razlika velika. Slojni tlak i tlak raspucavanja naslaga se moraju uzeti u obzir kako ne bi došlo do dotoka slojnog fluida u kanal bušotine ili gubitka fluida u formaciju.

#### 8.2.1. Cementna kaša i aditivi

Cementna kaša se dobiva miješanjem portland cementa, vode i aditiva koji imaju ulogu postizanja, odnosno podešavanja određenih svojstava cementne kaše. Cement koji se koristi u većini slučajeva je portland cement. Voda može sadržavati različite količine minerala koji utječu na svojstva cementne kaše. Zbog toga je potrebno obaviti pokusno ispitivanje cementne kaše u laboratoriju kako bi se odredilo vrijeme potrebno za utiskivanje cementne kaše i postizanja minimalne tlačne čvrstoće. Za uspješno dizajniranje cementne kaše moraju biti poznata njena potrebna svojstva (gustoća, vrijeme zgušćavanja, reološka svojstva i filtracija) te vrsta i količina aditiva koji će omogućiti podešavanje tih

svojstava. Ubrzivači i usporivači se koriste za skraćenje i za produljenje vremena zguščavanja cementne kaše. Za promjenu gustoće cementne kaše koriste se olakšivači (bentonit) i oteživači (barit), reološka svojstva se podešavaju dispergatorima, a filtracija se najčešće smanjuje derivatima celuloze. Naravno, kako bi se cementacija uspješno izvela, potrebno je odrediti volumen cementne kaše za cementiranje svake kolone zaštitnih cijevi. Protiskivanje cementne kaše u prstenasti prostor je također vrlo bitan parametar za uspješnu cementaciju, a ovisi o volumenu i brzini protiskivanja fluida za odvajanje cementne kaše i bušotinskog fluida te o tipu protjecanja cementne kaše.

#### 8.2.2. Oprema za cementaciju

Cementacijska peta ili peta kolone zaštitnih cijevi je cilindrični čelični komad kolone koji se postavlja na prvu cijev pri ugradnji kolone. Ima zaobljeno dno kako bi se spriječilo zapinjanje kolone za neravnine na stijenkama kanala bušotine. Prolaz kroz središte pete omogućuje izlaženje isplake i cementne kaše te ulaženje kaše u prstenasti prostor. Zaustavna ploča ima za zadatak da zaustavi gornji i donji čep kod cementacije. Ugrađuje se između spojnice prve i druge zaštitne cijevi ili negdje više u nizu zaštitnih cijevi. Centralizeri se postavljaju na vanjski dio zaštitnih cijevi, a svrha im je da održavaju niz zaštitnih cijevi odmaknut od stijenki kanala bušotine, tako da cementna kaša ravnomjerno popuni prstenasti prostor. Uz to, moraju omogućiti čišćenje stijenki bušotine, zaštititi strugače, spriječiti mogućnost nastajanja diferencijalnog prihvata i smanjiti trenje pri spuštanju kolone zaštitnih cijevi. Strugači se koriste za skidanje isplačnog obloga sa stijenki kanala bušotine, kako bi se ostvario bolji kontakt između cementne kaše i naslage. Koriste se dva osnovna tipa strugača: rotirajući (kruto vezani za zaštitne cijevi) i pomični (ograničeno se kreću između dva zaustavna prstena). Zaustavni prsten se postavlja na vanjsku stranu zaštitnih cijevi, a svrha mu je zadržavanje kretanja centralizera i strugača u unaprijed određenim granicama. Cementacijska košara se često postavlja na kolonu zaštitnih cijevi na mjestima gdje je porozne stijene potrebno zaštititi od velikih tlakova ili kada je potrebno zadržati stupac cementne kaše u prstenastom prostoru, dok ona ne stvrdne.

## 9. ODABIR DLIJETA

S obzirom da dlijeto predstavlja integralni dio niza bušaćih alatki, njegov pravilan odabir utječe na mehaničku brzinu bušenja, a samim time i na ukupno vrijeme bušenja, što u konačnici smanjuje ukupne troškove izrade bušotine. Postoji više čimbenika koji utječu na vrijeme bušenja, a koji se moraju uzeti u obzir prilikom odabira dlijeta. Tri osnovne vrste dlijeta različitih karakteristika koriste se za bušenje različitih formacija. Kako bi se postigla optimalna brzina bušenja, potrebno je, osim karakteristika dlijeta, poznavati i optimalne parametre i uvjete rada dlijeta.

Pri odabiru dlijeta potrebno je imati uvid u slijedeće parametre: litološki podaci, tlačna čvrstoća stijena, abrazivnost, reaktivnost glina, mjerena dubina, intezitet nagle promjene otklona kanala bušotine, zahtjev za odgovarajućim zazorom u prstenastom prostoru, promjeri zaštitnih cijevi, opterećenje na dlijeto, okretni moment na dlijetu koji može ostvariti dubinski motor, udio kanala bušotine koji se izrađuje rotacijskim načinom, pokretne naslage, vrste i svojstva bušotinskog fluida te potreba za inhibiranjem. Također, korisno je pribaviti zapise o bušenju prethodno izrađenih bušotina, jer oni mogu znatno olakšati odabir dlijeta. U njima se nalaze podaci o učincima korištenih dlijeta u probušnim naslagama, odnosno ostvarena mehanička brzina bušenja određenim dlijetom. Bitno je odrediti koje karakteristike dlijeta utječu na različite učinke dlijeta. Npr., ako je dlijetom ostvarena mala mehanička brzina bušenja, potrebno je ustanoviti uzroke koji su do toga doveli. Na taj se način može ukloniti pogreška i izbjeći ponovno ostvarivanje nedostatne mehaničke brzine bušenja. Kod odabira dlijeta, osim vrste i promjera, potrebno je uzeti u obzir i druge parametere kao što su predviđeno opterećenje na dlijeto, broj okretaja u minuti, očekivana brzina bušenja, pretpostavljeni vijek trajanja dlijeta te cijena koštanja po izbušenom metru.

### 9.1. Vrste dlijeta

U pravilu se za izradu kanala bušotine koriste tri vrste dlijeta: žrvanjska dlijeta, dijamantna dlijeta i polikristalinska dijamantna - PDC dlijeta (slika 9-1.). Svako od tih dlijeta koristi različite mehanizme razrušavanja stijene te se najčešće klasificiraju prema tvrdoći stijene koju mogu razrušiti.

### 9.1.1. Žrvanjsko dlijeto

Žrvanjsko dlijeto sastoji se od tijela dlijeta koje s gornje strane ima narezan konusni (muški) navojni spoj, a s donje strane ima ramena na koja su pričvršćene osovine na koje su navučeni žrvnjevi. Žrvnjevi po svom oplošju imaju zube ili umetke (inserte) koji su smješteni u nekoliko redova u određenom rasporedu, te su tijekom bušenja oslonjeni o dno bušotine pod utjecajem osnovnog opterećenja (Kavedžija, skripta s predavanja kolegija „Tehnika izrade bušotina I“). Oblik i zaoštrenost zubi, njihova radna visina i razmak između zuba ovise o tome za bušenje koje stijene je dlijeto predviđeno. Najčešće su u upotrebi dlijeta s tri žrvnja, odnosno trožrvanjska dlijeta. Pri rotaciji dlijeta žrvnjevi se okreću oko svoje osi i kotrljaju po dnu te djeluju ritmičkim periodičkim udarcima okomito na dno i razrušavaju stijenu. Žrvanjsko dlijeto, kao i svako drugo dlijeto, mora omogućiti protok isplake. Isplachni otvor može biti smješten centralno u osi dlijeta ili otvori mogu biti raspoređeni između žrvnjeva. Osnovni mehanizam razrušavanja stijene žrvanjskim dlijetom je drobljenje, a istovremeno mogu razrušavati stijenu rezanjem i/ili odlamanjem te istiranjem, ovisno o tvrdoći stijene.

### 9.1.2. Dijamantno dlijeto

Dijamantno dlijeto se sastoji od čeličnog tijela koje s gornje strane ima narezan navojni spoj, dok su na donjem dijelu tijela raspoređeni dijamanti koji su za tijelo dlijeta pričvršćeni uz pomoć matrice izrađene od volfram karbida. Kao i kod žrvanjskih dlijeta, radna visina, odnosno izloženost dijamanta ovisi o vrsti stijene koju će se razrušavati. Izrađuju se tri osnovne konstrukcije dijamantnih dlijeta. Jednoslojna dlijeta u matricu imaju ugrađene dijamante koji iz nje vire i imaju funkciju radnih elemenata. Kod višeslojnih dlijeta jedan dio dijamanta viri iz matrice, dok je jedan ili više slojeva dijamanta prekriven matricom. Kako se vanjski sloj dijamanta i matrice troši, tako se unutarnji slojevi raskrivaju i preuzimaju funkciju radnih elemenata. Impregnirana dlijeta sadrže dijamante koji su umiješani u masu matrice, tako da se kod trošenja dijamanta i matrice na radnom dijelu dlijeta pojavljuju novi dijamanti po cijeloj debljini matrice, gotovo do njenog istrošenja. Kako bi se osiguralo hlađenje isplakom, potrebno je da njene strujnice na radnom dijelu budu adekvatno raspoređene. Kod bušenja dijamantnim dlijetom krhotine imaju manje dimenzije, pa je preporučena dobava isplake za njihovo iznošenje premala za adekvatno hlađenje dlijeta. Zbog toga se dobava određuje s obzirom na

hlađenje dlijeta, kako ne bi došlo do „spaljivanja“ dijamanta. Upotrebom dijamantnih dlijeta postiže se veća učinkovitost po dlijetu, omogućen je mirniji rad dlijeta bez jačih vibracija, primjenjuje se manje osno opterećenje te dlijeta imaju veću trajnost. S druge strane, vrlo su skupa, zahtijevaju vrlo pouzdano hlađenje i vrlo su osjetljiva na udarce pri rukovanju. Osnovni mehanizam razrušavanja stijene dijamantnim dlijetom je istiranje.



**Slika 9-1.** Bušaća dlijeta; 1 – dijamantno dlijeto, 2 – žrvanjsko dlijeto, 3 – PDC dlijeto  
(<http://www.petroleumonline.com>)

#### 9.1.3. PDC dlijeto

PDC dlijeta imaju veću otpornost od dijamantnih dlijeta iz razloga što se za PDC dlijeta, umjesto monokristalinskih, koriste polikristalinski dijamanti. Monokristalinski dijamanti se, ako se primjeni sila u pravom smjeru, mogu kalati, što nije slučaj kod polikristalinskih dijamanta. PDC dlijeto sadrži PDC element koji se sastoji od kompaktnog sloja sitnih dijamantnih čestica koje se sintriranjem spajaju s debljim slojem volfram karbida. U njegovu je strukturu uključen i potporni element, također od volfram karbida, koji omogućuje spajanje PDC elementa na tijelo dlijeta. PDC dlijeta razrušavaju stijenu rezanjem, odnosno svladavanjem njene smične otpornosti. U usporedbi s tlačnom čvrstoćom, koja se svladava upotrebom žrvanjskih dlijeta, za svladavanje smične otpornosti stijene potrebna je manja energija. Također, u usporedbi s PDC dlijetom, dijamantno dlijeto tek struže po površini stijene, dok ju PDC dlijeta u određenom dijelu odlamaju ili režu.

## 9.2. Karakteristike dlijeta

Kod odabira dlijeta za izradu kanala bušotine, osim na vrstu dlijeta, pozornost treba obratiti i na konstrukcijske karakteristike dlijeta. Mlaznice se postavljaju u isplačne otvore radi ubrzavanja i usmjeravanja toka isplake u cilju poboljšanja čišćenja dna bušotine. U pravilu, mlaznice su izrađene da poboljšaju jedno ili sva četiri primarna svojstva mlaza isplake: brzina mlaza isplake, hidraulički tlak koji mlaz ostvaruje na dno bušotine, omogućavanje vrtložnog (turbulentnog) protjecanja i širina mlaza isplake. Bitno je napomenuti da, zbog smanjenja površine protjecanja, u mlaznicama dolazi do pada tlaka isplake, što izravno utječe na hidrauličku snagu dlijeta. Broj, veličina i raspored mlaznica imaju značajan utjecaj na mlaz isplake te se njihovim pravilnim odabirom povećava učinak dlijeta.

Kod žrvanjskih dlijeta, zubi imaju ključnu ulogu u učinkovitosti dlijeta. S obzirom na vrstu zubi, razlikuju se dlijeta s glodanim zubima i dlijeta s umecima, odnosno insertima od tvrdih metala. Dlijeta s glodanim zubima se uglavnom koriste za bušenje mekih i ljepljivih formacija, dok su insertna dlijeta dizajnirana za tvrde formacije. Kod dijamantnih dlijeta dijamanti su umiješani u matricu, te njihova izloženost i gustoća (kao i kod žrvanjskih dlijeta) određuje za kakve formacije je dlijeto pogodnije koristiti.

Žrvanjska dlijeta, s obzirom da imaju pomične dijelove, imaju i ležajeve (najčešće 3 – 5 ležajeva) koji mogu biti radijalni, aksijalni i radijalno – aksijalni, a omogućuju rotaciju žrvnja oko svoje osi. Radijalni ležajevi mogu biti valjkasti ili klizni, aksijalni ležajevi su klizni, a radijalno – aksijalni ležajevi su kuglični. Zaklinjavanje ili pregrijavanje ležaja može u kratkom vremenu dovesti do zaglavljivanja ili odlamanja žrvnja, što može biti uzrok većih havarija.

Tijekom izrade kanala bušotine može doći do smanjenja promjera dlijeta zbog trošenja kalibrirajuće površine dlijeta (vanjska strana tijela dlijeta i vanjski vijenac zuba) te se u takvim slučajevima mora proširivati kanal bušotine. Kako bi se takva situacija izbjegla, kalibrirajuća površina dlijeta se ojačava tvrdim materijalima otpornim na trošenje, kao što je volfram karbid. Na taj način se i produljuje vijek trajanja dlijeta.

## 10. BUŠAĆE POSTROJENJE

Bušaće postrojenje koristi se za izradu kanala bušotine, spuštanje i cementiranje kolone zaštitnih cijevi u kanalu bušotine i obavljanje pomoćnih operacija poput karotaže i raznih mjerenja u bušotini. U slučaju lošeg odabira bušaćeg postrojenja može doći do smanjene brzine bušenja ili oštećenja formacije zbog loše kontrole čvrstih čestica, što ujedno povećava troškove izrade bušotine. Iz tog razloga odabir postrojenja treba obaviti iskusno osoblje obučeno za takav zadatak.

Kod odabira postrojenja potrebno je definirati potrebnu opremu i različita opterećenja kojima će postrojenje biti izloženo. Prethodno definirani podaci koje je nužno znati za odabir postrojenja: vrste i svojstva bušotinskog fluida, odlaganje krhotina, volumeni cementne kaše i vrste aditiva, promjeri i dubine ugradnje zaštitnih cijevi, podaci o bušačem nizu alati (duljine, promjeri, naprezanja), tlak na manometru stojke te veličina, sastav i radni tlakovi opreme ušća bušotine. Izvođač radova posjeduje nekoliko raspoloživih bušačkih postrojenja između kojih se vrši odabir uzimajući u obzir nekoliko čimbenika.

Snaga bušaćeg postrojenja odnosi se na snagu bušaće dizalice. Bušaća dizalica namatanjem i odmatanjem bušaćeg užeta sa svog bubnja omogućava, preko koloturnog sustava, spuštanje niza alati u kanal bušotine te njegovo izvlačenje iz kanala bušotine. Kako bi se odabralo bušaće postrojenje određene snage, potrebno je odrediti maksimalnu težinu niza alati kojeg će dizalica pokretati, odnosno koji će biti ovješena na kuki.

Sljedeći čimbenik koji se mora uzeti u obzir odnosi se na isplaćne sisaljke. One pretvaraju energiju goriva ili električnu energiju pogonskog motora u hidrauličku energiju protoka isplake i predstavljaju ključni sklop sustava za optok isplake. U sastavu bušaćeg postrojenja nalaze se minimalno dvije isplaćne sisaljke, od kojih je jedna uvijek rezervna. Snaga sisaljki odabire se s obzirom na prethodno definirane dobave, tj. snaga sisaljki mora biti dovoljna da ostvari dobave potrebne za izradu kanala bušotine. Uz to, mora biti poznata vrijednost maksimalnog tlaka kojeg sisaljka može postići u izlaznom tlačnom cjevovodu.

Vršni pogon je integrirani pogonsko transmisijski sklop koji omogućuje navrtanje, odvrtanje i rotaciju niza bušačkih alati te dodavanje bušačkih šipki. Kod odabira vršnog pogona potrebno je uzeti u razmatranje dva bitna parametra: broj okretaja u minuti (kako bi se mogla postići željena brzina bušenja) i maksimalno opterećenje koje vršni pogon može podnijeti (kako bi mogao podnijeti težinu ovješena niza alati).



Kod odabira bušačeg postrojenja, pažnju treba obratiti i na kapacitet isplasnih bazena u kojima se isplaka priprema i skladišti. Za to je potrebno odrediti volumen isplake u cirkulacijskom sustavu, koji prvenstveno ovisi o duljini bušotine. Također, treba odabrati sustav za pročišćavanje isplake.

Kada se odabere bušaće postrojenje, radi se analiza cjelokupnog projekta u suprotnome smjeru, počevši od odabira bušačeg postrojenja prema dizajniranju opremanja.

## 11. ZAKLJUČAK

Izrada projekta bušotine je vrlo kompleksna i spada među najzahtjevnije procese u bušačem inženjerstvu. Kriteriji koji se moraju zadovoljiti prilikom projektiranja bušotine su sigurna izrada kanala bušotine i ekonomska isplativost bušotine. Oprema koja će se koristiti mora omogućiti siguran rad osoblja koje će sudjelovati u izradi bušotine te planirana cijena koštanja mora biti u rasponu omogućenih sredstava predviđenih za izradu bušotine. Također, mora biti omogućena dostatna proizvodnja nafte/plina nakon što je izrada bušotine završena. Iz tih razloga svakome se segmentu projekta bušotine mora pristupiti s velikom ozbiljnošću kako nijedan od navedenih kriterija ne bi bio ugrožen.

Postoji više različitih načina, odnosno procesa kojima se izrađuje projekt bušotine. Kroz ovaj rad opisan je način izrade projekta prema dijagramu toka autora S. Devereuxa, koji se vrlo često koristi. Dijagram sustavno prikazuje tijek projektiranja te podatke koji moraju biti definirani pojedinim segmentom projekta, kao i ulazne podatke potrebne za njihovo definiranje. Iako je tijekom izrade kanala bušotine potrebno slijediti smjernice na ovaj način izrađenog projekta, u slučaju nepredviđenih situacija projekt se može naknadno modificirati.

## 12. LITERATURA

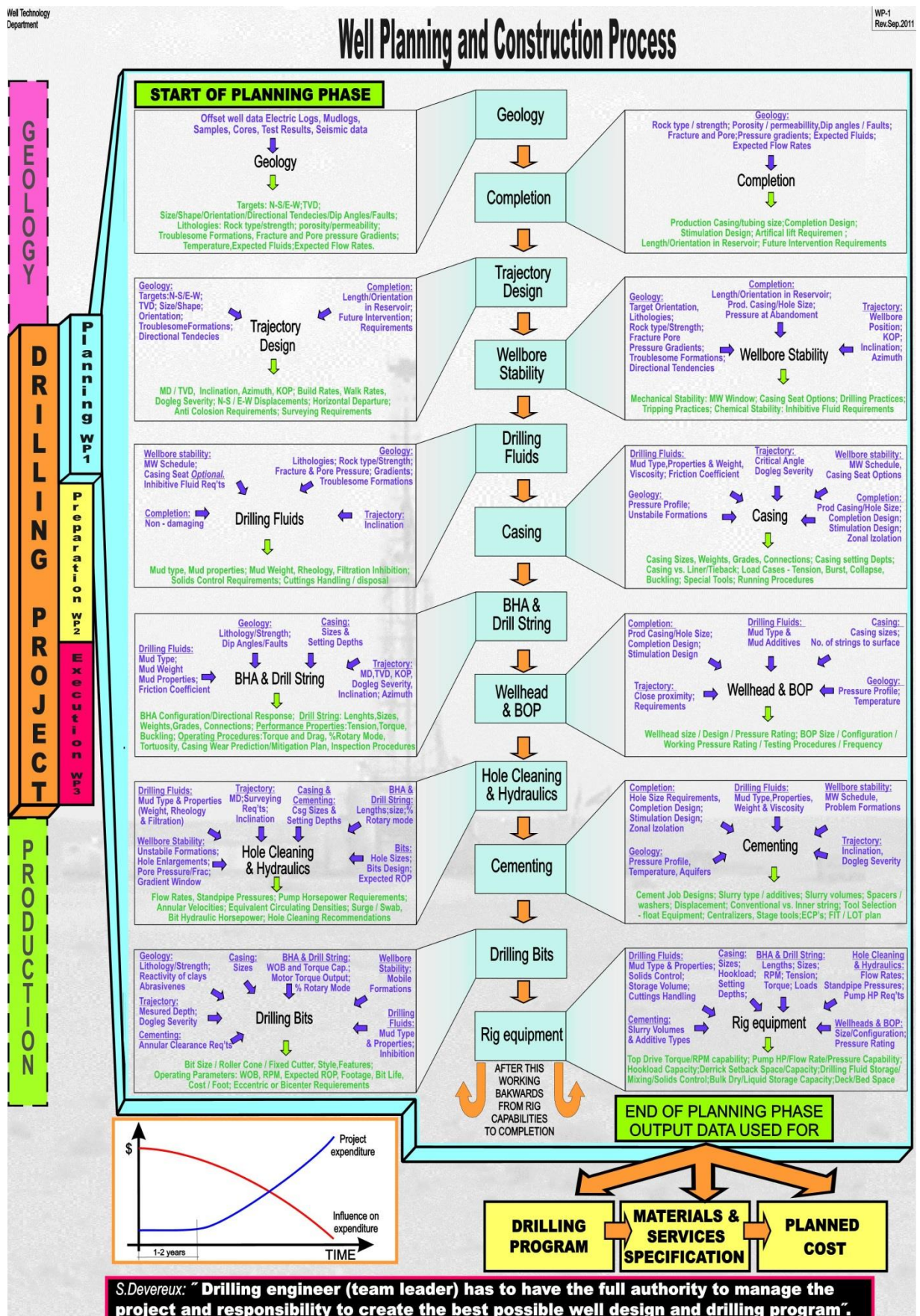
1. Adams, N. J., 1985., Drilling Engineering: A Complete Well Planning Approach. Tulsa: PennWell Publishing Company.
2. Backer, T., 2013., Borehole Geomechanics and Well Design. Potsdam: IGA International Geothermal Association Academy Report 0103-2013.
3. Clegg, J. D., 2007., Petroleum Engineering Handbook, Vol. IV. Texas: Society of Petroleum Engineers.
4. Devereux, S., 1998., Practical Well Planning and Drilling Manual. Tulsa: PennWell Corporation.
5. Gaurina – Međimurec, N., 2010., Materijali s predavanja kolegija „Bušenje II“. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
6. Gaurina – Međimurec, N., 2009., Skripta s predavanja kolegija „Bušotinski fluidi I“. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
7. Kavedžija, B., Skripta s predavanja kolegija „Tehnika izrade bušotina I“. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
8. Krištafor, Z., 2009., Projektiranje zacjevljenja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
9. Matanović, D., Moslavac, B., 2011., Opremanje i održavanje bušotina. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
10. Mian, M. A., 1992., Petroleum Engineering Handbook for the Practicing Engineer, Vol. II. Tulsa: PennWell Publishing Company.

### Internet izvori

11. Bloys, B., Davis, N., Smolen, B., Bailey, L., Fraser, L., Hodder, M., 1994. Designing and Managing Drilling fluid.  
URL: [www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield\\_review/ors94/0494/p33\\_43.ashx](http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors94/0494/p33_43.ashx) (29.06.2015.)
12. Taher Hamdani, M., 2014. Drillstring & BHA Design.  
URL: [www.slideshare.net/MTaherHamdani/drillstring-bha-design](http://www.slideshare.net/MTaherHamdani/drillstring-bha-design) (02.07.2015.)
13. URL: [www.wipertrip.com/completion/wellhead/659-selection-guidelines-for-wellhead-equipment.html](http://www.wipertrip.com/completion/wellhead/659-selection-guidelines-for-wellhead-equipment.html) (14.06.2015.)

14. URL: [www.wipertrip.com/drilling-fluids/miscellaneous/349-hydraulics-optimization-hole-cleaning.html](http://www.wipertrip.com/drilling-fluids/miscellaneous/349-hydraulics-optimization-hole-cleaning.html) (22.06.2015.)
15. Pandey, A. K., Well Stimulation Techniques.  
URL: <http://petrofed.winwinhosting.net/upload/Wellstimulationtech.pdf> (14.07.2015.)
16. URL: <http://www.petroleumonline.com/content/overview.asp?mod=4> (05.07.2015.)
17. URL: <http://www.drillingformulas.com/flow-regime-and-critical-reynolds-number-for-drilling-hydraulics/> (02.09.2015.)
18. URL: <http://www.iwcfdrillengineer.com/id5.html> (28.05.2015.)
19. Oilfield Market Report, 2004. Spears & Assoc. Inc., Tulsa.  
URL: [www.spearsresearch.com](http://www.spearsresearch.com)

# Prilog 1. Dijagram toka – faze projektiranja prema S. Devereuxu



## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam diplomski rad samostalno izradio.

---

Boris Čulić